



**Escuela  
Politécnica  
Superior**

# **ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA DEL TERRENO EN LA CUENCA DEL ALTO GUADALENTÍN. INVESTIGACIONES PREVIAS, EVOLUCIÓN, CAUSAS Y CONSECUENCIAS**



Máster Universitario en Ingeniería de los  
Materiales, del Agua y del Terreno

## **Trabajo Fin de Máster**

**Autor:**

D. Manuel Abellana Lario

**Tutor:**

Dr. Roberto Tomás Jover

**Septiembre de 2015**



**Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante**

**Línea de investigación: Mecánica de suelos**

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA DEL  
TERRENO EN LA CUENCA DEL ALTO GUADALENTÍN.  
INVESTIGACIONES PREVIAS, EVOLUCIÓN, CAUSAS  
Y CONSECUENCIAS**

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>5</b>
<b>1.INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1.Objetivos.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.Antecedentes.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.Estructura de la memoria.....</b>	<b>15</b>
<b>2.ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.Subsidencia.....</b>	<b>17</b>
2.1.1.Concepto .....	17
2.1.2.Tipos de subsidencia.....	18
2.1.3.Importancia del fenómeno de la subsidencia.....	21
2.1.4.Subsidencia originada por la extracción de agua desde acuíferos confinados.....	27
2.1.4.1.Principios generales.....	27
2.1.4.2.Casos registrados de subsidencia por sobreexplotación de acuíferos.....	31
2.1.4.3.La subsidencia en México D.F. como ejemplo de subsidencia provocada por sobreexplotación de acuíferos.....	33
2.1.4.4.La subsidencia en Arizona.....	40
2.1.4.5.La subsidencia en Murcia como ejemplo de subsidencia provocada por sobreexplotación de acuíferos en nuestro país.....	46
2.1.5.Subsidencia originada por movimientos tectónicos.....	65
<b>2.2.Técnicas de radar interferométrico de apertura sintética (InSAR) en el estudio de la subsidencia .....</b>	<b>72</b>
<b>2.3.Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) en el estudio de la subsidencia.....</b>	<b>75</b>
<b>2.4.Estudios sobre la subsidencia en el Valle del Guadalentín.....</b>	<b>78</b>
2.4.1.Introducción.....	78
2.4.2.Artículo “The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading”. Nature Geoscience. DOI: 10.1038/NGEO1610. Pablo J. González, Kristy F. Tiampo, Mimmo Palano, Flavio Cannavó y José Fernández (2011).....	78
2.4.3.Tesis doctoral “Monitorización de fenómenos geodinámicos aplicando técnicas GNSS”. Alberto Antón Merino (2014).....	80
2.4.4.Artículo en revisión “Multi-sensor advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: Alto Guadalentín Basin (Spain)”. Roberta Boni et al.....	90
2.4.5.Datos de subsidencia en la cuenca del Alto Guadalentín obtenidos por InSAR, entre 1992 y 2012.....	96

2.4.6. Artículo “Deformación cortical de las Béticas Orientales observada mediante GPS y su relación con el terremoto de Lorca”. Anna Echeverría, Giorgi Khazaradze, Eva Asensio, Jorge Gárate y Emma Suriñach (2012).....	100
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>109</b>
<b>3.1. Diagrama de flujo.....</b>	<b>109</b>
<b>3.2. Desarrollo de la metodología.....</b>	<b>110</b>
<b>4. DESCRIPCIÓN DEL VALLE DEL GUADALENTÍN.....</b>	<b>120</b>
<b>4.1. Localización y características socioeconómicas.....</b>	<b>120</b>
4.1.1. Localización.....	120
4.1.2. Organización administrativa y demografía.....	121
4.1.3. Factores económicos.....	123
4.1.3.1. Agricultura.....	123
4.1.3.2. Ganadería.....	126
4.1.3.3. El sector industrial.....	127
4.1.3.4. Construcción.....	128
4.1.3.5. El sector servicios.....	129
<b>4.2. Climatología.....</b>	<b>132</b>
<b>4.3. Hidrología superficial y profunda.....</b>	<b>136</b>
4.3.1. Hidrología superficial.....	136
4.3.2. Hidrología subterránea.....	141
<b>4.4. Geomorfología y tectónica.....</b>	<b>154</b>
<b>5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>162</b>
5.1. Causas y características propias de la subsidencia en la zona.....	162
5.2. Correlación entre datos InSAR y patologías en construcciones.....	166
5.3. Correlación entre datos InSAR e incidencias en canales de riego.....	191
5.4. Correlación entre datos InSAR e incidencias en el terreno.....	205
5.5. Correlación entre datos InSAR y zonas de inundabilidad.....	219
5.6. Análisis de consecuencias de la subsidencia en la zona.....	225
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>228</b>
<b>7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>231</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>233</b>
<b>ANEXO DE FICHAS RESUMEN DE INCIDENCIAS Y PATOLOGÍAS.....</b>	<b>239</b>



## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo, que se ha prolongado a lo largo de varios meses, no habría sido posible sin la inestimable ayuda y colaboración de las siguientes personas, a las que expreso mi más sincero agradecimiento.

- Dr. Roberto Tomás Jover. Universidad de Alicante.
- D.<sup>a</sup> Margarita Sanabria Pabón. Instituto Geológico y Minero de España.
- D.<sup>a</sup> Roberta Boni. Universidad de Pavía.
- Dr. Gerardo Herrera García. Instituto Geológico y Minero de España.
- D. Manuel Camacho Piñera. Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas e Ingenieros Civiles de Murcia.
- D.<sup>a</sup> Lorena Chiva Miralles. Universidad de Alicante.
- D.<sup>a</sup> Alba Fernández Aguirre. Comunidad de Regantes de Lorca.
- D. Manuel Soriano Ibarra. Comunidad de Regantes de Lorca.
- D. Salvador Cerezo Hernández. Confederación Hidrográfica del Segura.
- Dr. Antonio José Tenza Abril. Universidad de Alicante.
- Dr. Javier Valdés Abellán. Universidad de Alicante.
- D. José Jiménez Tobarra. Excelentísimo Ayuntamiento de Lorca.
- D. Pedro Díaz Millán.
- D. Juan Lucas Pérez.
- D.<sup>a</sup> Elena Alcaraz Murcia.
- D. Francisco Alcaraz Murcia.
- D.<sup>a</sup> Salvadora Díaz García.
- D.<sup>a</sup> Isabel M<sup>a</sup> López Abellaneda.
- D. José López Alcaraz.
- D. Pedro Daniel García Coronel.
- D.<sup>a</sup> María Abellaneda Millán.

# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Objetivos**

El objetivo general de este trabajo fin de máster es el análisis y síntesis de los principales estudios realizados, hasta la fecha, así como la profundización en la investigación sobre la importante tasa de subsidencia que está experimentando la cuenca del Alto Guadalentín durante las últimas décadas.

El objetivo general anteriormente expuesto se puede dividir en los siguientes objetivos específicos:

- Confirmación de que la subsidencia del Valle del Guadalentín está provocada, principalmente, por la sobreexplotación de acuíferos, y en todo caso, detectar si existe alguna causa secundaria, como la tectónica.
- Justificación de los motivos por los cuáles existen dificultades para encontrar los signos externos de subsidencia, del apartado anterior, en el Valle del Guadalentín a diferencia de otros casos del mismo tipo de subsidencia en el mundo.
- Localización e identificación de casos concretos de consecuencias físicas del fenómeno de la subsidencia en el terreno, tales como grietas y hundimientos en el terreno, patologías en construcciones y variaciones anómalas de la pendiente en parcelas y canales de riego.

### **1.2. Antecedentes**

El Valle del Guadalentín tiene una gran relevancia tanto desde el punto de vista agrícola, como socioeconómico en el contexto geográfico del sureste de la península ibérica. Numerosos estudios e investigaciones han demostrado que la superficie del Valle está descendiendo por subsidencia, atribuyendo el fenómeno, en mayor o menor medida, dependiendo del estudio de que se trate, tanto a la continua evolución tectónica de la zona, como al fenómeno de sobreexplotación de los acuíferos.

Tal es la situación, que se considera actualmente que es la zona de Europa con mayor tasa de subsidencia documentada.

A continuación se presentan una serie de artículos publicados en prensa (Figura 1.2.1 a Figura 1.2.8) en los que se hace referencia los fenómenos de sobreexplotación de acuíferos y los posibles efectos de la subsidencia en la cuenca del Alto Guadalentín, así como de otros fenómenos relacionados con el asunto.

Un estudio ha revelado que el municipio murciano de Lorca tiene las mayores tasas de hundimiento del terreno de Europa por extracción de agua subterránea. Desde 1995, la superficie se ha hundido más de 1,5 metros. El estudio se ha realizado en el marco del Campus de Excelencia Internacional de Moncloa, por investigadores del CSIC y la Universidad Complutense de Madrid, mediante observación radar de satélites de la Agencia Europea del Espacio.

El hundimiento del terreno debido a extracción de agua subterránea o a la apertura de minas es un fenómeno bien conocido. Ese hundimiento se conoce como subsidencia y se debe a que el agua subterránea rellena el terreno y ejerce un efecto de sustentación sobre la parte más superficial de éste. Al vaciarse el agua del subsuelo, la parte aérea del terreno se hunde.

Es un fenómeno que ocurre en muchos lugares. Este mismo mes, la ciudad de Manila, en Filipinas ha sufrido graves inundaciones posteriores al paso de varios tifones. Los expertos aseguran que el efecto se agravó debido a que el terreno de la capital filipina se está hundiendo debido a la explotación de sus acuíferos.

En el caso de Lorca, el estudio recién presentado estima unas tasas de hundimiento de hasta 15 centímetros por año, las mayores de toda Europa. Aunque el centro de la región deprimida corresponde al municipio Lorca, la extensión de la superficie es de unos 690 kilómetros cuadrados e incluye las localidades de Puerto Lumbreras, Totana y Alhama de Murcia. Según el coautor del trabajo, Pablo González,

La cuenca del río Guadalentín, donde se asientan esas localidades, es una vega muy fértil y durante las últimas décadas ha desarrollado un potente sector agrario. Sin embargo, la demanda de agua para sostener las explotaciones agrícolas ha crecido enormemente. En una región semiárida, como es el suroeste de la Península Ibérica, con recursos hídricos limitados, su uso ha acabado por ser deficitario. Y así, desde mediados de los años 60 se han extraído del subsuelo recursos hídricos subterráneos para sostener esta actividad.

González Méndez. Este estudio, y su relación con los procesos de sequía, se ha publicado en la prestigiosa revista 'Geology'.

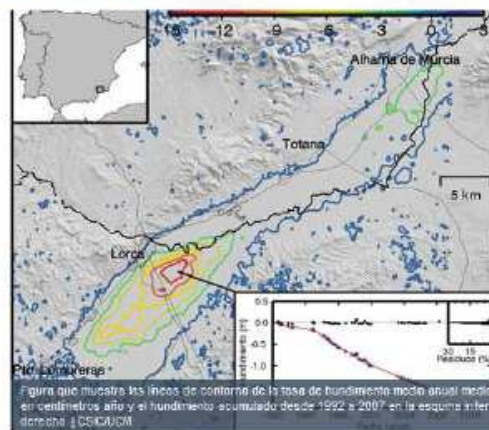
Los investigadores han observado que la explotación de agua subterránea es muy superior a las recargas naturales, es decir, el agua que se infiltra en el terreno proveniente de la lluvia o del retorno de la que se usa para regar, lo que se manifiesta en las últimas décadas en un descenso sostenido de las reservas de los acuíferos.

Este descenso produce que los materiales del acuífero -rocas y sedimentos que forman la matriz sólida- estén sometidos a menor presión interna, se compacten y pierdan volumen. Esta pérdida de volumen se transmite generando un hundimiento de la superficie del terreno. Este proceso de hundimiento sobre acuíferos es un fenómeno bien conocido por investigaciones previas, aunque no se conocía su ocurrencia en la vega de Lorca. Sin embargo, ha sido sorprendente encontrar tasas de hundimiento que alcanzan valores máximos entre seis y 15 centímetros por año, lo que hace que sea una de las zonas con tasas de hundimiento más rápidas en el planeta, y la mayor de Europa afectando una extensión tan grande aproximadamente 690 kilómetros cuadrados.

Un segundo aspecto destacable es que el nivel de detalle y el análisis temporal de los datos revelan que la tasa de hundimiento no fue constante durante todo el periodo. Así tras la sequía de los años 1992 a 1995, el terreno respondió con una aceleración de la tasa de hundimiento, alcanzando más de 15 centímetros por año entre 1996-1997. Esta fase de aceleración se estableció de forma rápida en el tiempo, seguida por una desaceleración exponencial que duró ocho años, tras los cuales las tasas de hundimiento volvieron a los valores que se registraban durante el periodo estudiado inicialmente (1992-1995).

GEOLOGÍA | Hasta 15 centímetros por año

## El suelo de Lorca se hunde por la explotación excesiva de los acuíferos



El estudio se ha dado a conocer en el Campus de la Excelencia Moncloa

ELMUNDO.es | Madrid

Actualizado lunes 24/10/2011 14:53 horas

Figura 1.2.1: Artículo sobre la subsidencia y su relación con la sobreexplotación de acuíferos. El Mundo, el 24/10/2011.

EL ESTUDIO DE LOS DESASTRES NATURALES

## La sobreexplotación del acuífero agravó el seísmo

La actividad humana ayudó a originar el temblor y aumentó su fuerza, asegura un estudio

La consistencia del terreno ha cambiado en los últimos años por la gran extracción de agua

ANTONIO MADRIDEJOS  
BARCELONA

MARTES, 23 DE OCTUBRE DEL 2012

La sobreexplotación mediante pozos del acuífero del Alto Guadalentín, hasta el punto de que el nivel del agua subterránea ha bajado 250 metros desde 1960, intensificó los efectos del terremoto que afectó a la localidad murciana de Lorca en mayo del 2011, según sostiene un estudio internacional con participación de investigadores españoles e italianos. «No decimos que la extracción de agua fuera la causante, pero sí que contribuyó a desencadenarlo y a la magnitud que tuvo», dice a este diario uno de los autores del trabajo, José Fernández Torres, investigador del CSIC en el Instituto de Geociencias de Madrid. El problema en la comarca es que la sobreexplotación del acuífero, la extracción continuada de agua para agricultura y consumo doméstico, está cambiando el peso y la consistencia del terreno.

Aunque son relativamente frecuentes los hundimientos motivados por la sobreexplotación de acuíferos, las características de un seísmo se vinculan a un fenómeno ocasionado por la actividad humana. Los científicos lo explican en la revista *Nature Geoscience*.

**SATELITE, RADAR Y GPS** / Los científicos, encabezados por Pablo González, investigador de la Universidad de Toronto (Canadá), llegaron a esta conclusión tras estudiar con los satélites Envisat la deformación del terreno. La sorpresa fue observar que el segmento de terreno que más se movió durante el terremoto coincidió especialmente donde es mayor la extracción de agua. Los autores sostienen que en las zonas más afectadas el terreno acumulaba más energía y era más fácil la ruptura.

Estudios previos de González y Fernández ya habían constatado que buena parte de la comarca se hundía unos centímetros por año, e incluso 15 en las zonas con mayor extracción de agua en épocas de sequía. «En la subsidencia [hundimiento del terreno] de hasta un metro en la última década», prosigue Fernández, desde el 2006 analizando las tasas de deformación del terreno a partir de imágenes por satélite, Google Earth.

Los autores del trabajo argumentan que la extracción de agua perturbó la corteza terrestre en una zona llamada Alhama, y ello generó, entre otras consecuencias, que el terremoto tuviera un hipocentro muy superficial. De hecho, los daños causados fueron muy superiores a los que cabría esperar para un terremoto de la magnitud que tuvo el seísmo del 2011.

Los científicos desarrollaron un modelo matemático a partir de los datos históricos de extracción de agua y el área de hundimiento detectada entre 1992 y 2007. Así se pudo simular los cambios de esfuerzos al comienzo de la extracción se vio «de qué modo y dónde afectaba a la falla de Alhama», escriben los autores.

«Los datos presentados y los resultados del modelo -añaden- son consistentes con un proceso de deformación que proporciona una explicación plausible sobre cómo se movió la falla». Según Fernández Torres, el estudio «muestra una variación del peso sobre la corteza terrestre, en este caso una disminución debida a la extracción de agua, características de un terremoto».

**BÚSQUEDA DE MÁS PRUEBAS** / Giorgi Kharadze, profesor de Geología de la Universitat de Barcelona, que ha realizado estudios sobre la zona de Lorca, destaca que el hundimiento es espectacular comparado, por ejemplo, con el de Bages, otro ejemplo de municipio afectado por movimientos en las aguas subterráneas. Al margen de la situación de Lorca contribuyen las características sedimentarias del terreno, «que se complican en esta zona». Sin embargo, el especialista de la UB considera que para validar totalmente la hipótesis de la Alhama se necesitan más estudios en otras zonas. «El vínculo entre la subsidencia y el terremoto es cuestionable, y podría obedecer a la coincidencia de un estudio es muy interesante y creo que es una línea en la que deberíamos profundizar», concluye.

Figura 1.2.2: Artículo que relaciona la sobreexplotación del acuífero con el terremoto del 11 de mayo 2011. El Periódico, 23/10/2012.



GEODINÁMICA

## «La sobreexplotación del acuífero del Guadalentín no causó el terremoto»

A punto de cumplir su primer aniversario, el geólogo de la UPCT Tomás Rodríguez Estrella rebate la teoría de que los seísmos de Lorca del 11 de mayo tuvieron un origen 'hidrosísmico'

08.05.12 - 18:19 - MIGUEL ÁNGEL MUÑOZ

A falta de unos días para cumplirse el primer aniversario de los dos últimos terremotos mayores de 4,5 grados en la escala Richter que ha sufrido la Región de Murcia en los últimos 20 años -Aguilas (1996), Mula (1999), Bullas (2002), Alcedo (2005) y los dos de Lorca del pasado 11 de mayo-, el profesor de Geodinámica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Tomás Rodríguez Estrella, uno de los mayores especialistas en el tema, descarta que la causa fuera la extracción masiva de agua subterránea en la cuenca del Guadalentín, una de las teorías que defienden algunos científicos.

Apenas dos meses después del seísmo y posterior tsunami en Japón, la catástrofe de Lorca y se sintió en toda la Región, así como en Almería, Albacete, Alicante, Granada, Jaén, Málaga, Ciudad Real e incluso Madrid. Con una magnitud de 4,5 grados el primero y 5,1 el principal, dejaron un balance de nueve víctimas mortales, más de 320 heridos, 15.000 personas sin hogar y daños materiales por valor de miles de millones de euros (los techos de edificios aún continúan un año después).

El pasado mes de julio, Miguel de las Doblas, geólogo del Instituto de Geociencias de Madrid, argumentó que existían «inegables relaciones causa-efecto» entre «la sismicidad destructiva» del 11 de mayo y la sobreexplotación del acuífero del Guadalentín.

En su opinión, se trató de un caso de 'hidrosismicidad', una especialidad geológica desarrollada por el científico y que estudia la influencia del agua (lluvia, pantanos, inundaciones, monzones, etc.) para originar ciertos seísmos.

El experto señaló que las «peculiaridades» del terremoto, como la superficialidad del epicentro, a solo tres kilómetros de profundidad, estaban relacionadas con la alta subsidencia (hundimiento) del terreno del Valle, de más de diez centímetros al año.

«Creemos que existen indicios suficientes para sospechar que la sismicidad anómala de Lorca pudo ser en parte inducida por la extracción masiva de agua subterránea durante años para su uso agrícola e industrial», subrayó Doblas. Sin embargo, Rodríguez Estrella considera que no existe relación directa e inmediata entre ambos fenómenos.

La sobreexplotación de los acuíferos, explica, puede causar una subsidencia en el terreno. Si el acuífero es kárstico carbonatado (se produce una disolución de los terrenos por el efecto del agua sobre ellos) con cuevas, al bajar el nivel del agua subterránea (denominado nivel piezométrico) y si se produce un hundimiento brusco de las bóvedas de las cuevas, puede dar lugar a un pequeño terremoto.

No obstante, apunta que, en el caso del acuífero del Valle del Guadalentín, está constituido por materiales no consolidados (gravas, arenas y limos) y conforme ha ido bajando el nivel del agua se ha ido produciendo una compactación lenta de la zona no saturada (seca) desde los años sesenta del siglo pasado, que no permite que se produzca hundimientos subterráneos repentinos.

Por otro lado, indica que las compactaciones, allí donde se den dentro del Valle, se tienen que situar en la zona seca, es decir, hasta los 300 metros, que es la profundidad máxima a la que se encuentra el nivel piezométrico en Puerto Lumbreras. Los hipocentros (profundidad del terremoto) de los dos seísmos del año pasado, en cambio, se localizaron entre uno y tres kilómetros, profundidades en las que ya no existe ni siquiera acuífero (solo tiene, como máximo, 500 metros de espesor).

El profesor de la UPCT explica que los fenómenos de colapso están restringidos a una zona muy concreta, de tal manera que, en el caso de que se produjeran, y con ellos terremotos, serían de pequeña magnitud. Otra de las razones para descartar la teoría de Miguel de las Doblas es que al originarse a una profundidad escasa, tienen una influencia espacial muy limitada, mientras que el terremoto de Lorca tuvo una magnitud de 5,1 y se sintió hasta en Madrid.

Los terremotos ligados a colapsos también pueden darse en galerías mineras. El 2 de mayo de 1998 tuvo lugar un pequeño sismo de magnitud 2,3 en el Campo de Cartagena, ligado a la Falla de la Cierva. La energía que se liberó se desplazó hacia el sur y alcanzó el municipio de La Unión, donde causó el derrumbe de la mina 'Lo Veremos', que se encontraba en un alto grado de deterioro y en la que se vinieron abajo subitamente algunas de sus galerías. El brusco colapso causó otro terremoto de magnitud superior al que había originado el fenómeno, aunque solo se sintió en La Unión.

También se pueden producir hundimientos y pequeños terremotos cuando se produce la instalación de un embalse superficial de gran volumen. Es el caso del Cenajo (el de mayor capacidad de la Cuenca del Segura), donde tuvieron lugar algunos seísmos de magnitud en torno a uno. El fenómeno, indica, fue muy localizado y, sobre todo, «pasajero», puesto que no ha vuelto a haber más sismicidad en esta zona. En el caso del terremoto de Lorca, el investigador recuerda que no ha sido el primero ni será el último, pues el epicentro se localizó en la traza de la Falla de Alhama de Murcia (FAM), la más activa de la Península Ibérica, que libera energía de una manera casi constante, aunque mediante seísmos de una magnitud inferior a uno (totalmente imperceptibles para las personas).

Rodríguez Estrella destaca que los temblores del 11 de mayo fueron totalmente atípicos por muchas razones: la profundidad del sismo principal fue de solo un kilómetro, la existencia de un precursor de menor magnitud, las escasas evidencias en el epicentro y las réplicas fuera de la traza principal de la FAM.

«Tenemos que relacionarlo con el corredor tectónico del norte del Valle de Guadalentín, que no solo está constituido por los dos ramales de falla (septentrional y meridional) del segmento Totana-Lorca, sino que también existen otras fallas en pleno valle que elevan el sustrato, constituyendo lo que se denomina un horst tectónico», explica.

Este horst ha hecho que el sustrato metamórfico bético se eleve hasta los 300 metros de profundidad y los sondeos que lo han alcanzado presentan un grave problema de gases (dióxido de carbono).

El geólogo reconoce que existe una subsidencia en el Valle del Guadalentín (en especial en el Alto) relacionada con la sobreexplotación de los acuíferos, que ya se puso de manifiesto en 1996. Concretamente en la zona de Altorbado (Lorca) se producen desplomes de los 'piping' (agujeros existentes en el terreno, parecidos a las madrigueras de los conejos, producidos por fenómenos de erosión y disolución), que han ocasionado roturas en las conducciones de agua y roturas en las carreteras y carreteras. «Pero en ningún caso -añade- estos roturas han dado lugar a terremotos».

La sobreexplotación ha ocasionado desde 1960 hasta 2010 un descenso de los niveles de los acuíferos de hasta 300 metros y un hundimiento que en 15 años (1992-2007) ha sido a razón de 1,5 centímetros al año, el mayor registrado en toda Europa. Este fenómeno se ha detectado mediante los radares de los satélites de la Agencia Europea del Espacio.

Una de las experiencias de subsidencia más recientes, muy similar a la del Guadalentín, ocurrió en la Vega Media del Segura en 1994. Como consecuencia de la gran sequía de ese año, se realizaron numerosos sondeos para buscar agua y muchos de ellos se efectuaron en las proximidades de la ciudad de Murcia.

La consecuencia fue que se produjo un descenso del nivel freático (nivel del agua subterránea) de hasta 7 metros y el hundimiento en algunos puntos de la ciudad de hasta 70 centímetros, con los consiguientes desperfectos urbanísticos. No se produjeron pequeños seísmos relacionados con este fenómeno, porque este acuífero (al igual que el del Guadalentín) es detrítico, es decir, formado por terrenos no consolidados (sueltos) tales como gravas, arenas y limos. Por ello, al bajar el nivel piezométrico y crearse una nueva zona no saturada (que estaba ocupada antes por agua subterránea), el peso de los edificios hace que esa zona, antes con agua y ahora con aire entre los poros, sufra una compactación diferencial y un hundimiento paulatino, con el fin de adaptarse a la nueva situación y conseguir el equilibrio entre las rocas.

«Son ejemplos para ilustrar que se puede producir un terremoto por fenómenos de colapso o hundimiento, pero es imposible relacionar el terremoto de Lorca del pasado 11 de mayo con la sobreexplotación de los acuíferos del Alto Guadalentín», concluye.

Figura 1.2.3: Artículo que argumenta en sentido contrario del anterior y expone que la sobreexplotación de acuíferos no tuvo que ver con el terremoto. La Verdad 08/05/2012.

## Una riada hecha de agua y negligencias

Los políticos murcianos achacan los daños de la riada que tuvo lugar en Lorca a la "excepcionalidad" de la tormenta.

No hablan de los fallos que agravaron la tragedia, como el aumento de las construcciones en zonas inundables o las carreteras que dificultan el paso de las aguas.

Belén Toledo

08/10/2012 - 09:13h

Compartir

71

Me gusta

Twitter

30



Imagen de las inundaciones en Lorca tras la riada del 29 de septiembre. Antecor: Juan Albad y Pilar Sánchez (asociación ACUDE)

### Permitido construir en llanura inundable

Sin embargo, las autoridades permiten la construcción en estos terrenos. En el último Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) elaborado por el Ayuntamiento de Lorca a finales de la pasada década, la zona inundada aparece calificada ([http://www.urbanismo.lorca.es/pdf/documentos/TOMO VI/01\\_CLASIFICACION-DEL\\_SUELO\\_Y\\_ORD\\_DEL\\_TERRITORIO.pdf](http://www.urbanismo.lorca.es/pdf/documentos/TOMO VI/01_CLASIFICACION-DEL_SUELO_Y_ORD_DEL_TERRITORIO.pdf)) en su mayoría como "urbanizable especial de huerta" aunque también hay partes "no urbanizables agrícolas". Según el consistorio, se pueden construir viviendas si se cuenta con 5.000 metros cuadrados de terreno. El resultado de este planeamiento es que la zona está llena de edificaciones: viviendas, granjas, etc.

El problema, sin embargo, no es actual. Las construcciones en la zona aumentan rápidamente desde hace décadas. En concreto, se ha multiplicado por dos e incluso por tres en algunas pedanías de la zona desde los años 60, como denunció ya en 2008 el geógrafo y profesor de la Universidad de Murcia Alfredo Pérez Morales en un estudio ([http://www.ub.edu/geocrit-xcol/167.htm](http://www.ub.edu/geocrit/xcol/167.htm)) de título elocuente: "Aumento del riesgo de inundación por ocupación indebida de las áreas de convergencia en el Sur de la Región de Murcia".

Figura 1.2.4: Extracto de un artículo sobre la riada de 2012 en el que se pone de manifiesto que se había permitido construir en llanura inundable. El Dirario.es 08/10/2012.



realizado el CSIC  
y la Complutense  
de Madrid

Torres del Instituto de Geociencias (CSIC-UCM) y Pablo José González Méndez, investigador contratado durante el desarrollo del trabajo y actualmente en el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Western Ontario, Canadá.

El equipo de Investigación, en colaboración con la profesora Kristy F. Tiampo, de la Universidad de Western Ontario, en Canadá, y el Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia de Italia, también estudia la serie sísmica de Lorca del pasado 11 de mayo, que permitirá conocer el proceso de ruptura y liberación de energía sísmica en la falla responsable.

PUBLICADA EN LA DIRECCIÓN LUIS

<http://www.20minutos.es/noticia/1188348/0/loro+fac+hundimiento+mar+rapid+planeta/>

ACCEDER A LA NOTICIA ONLINE CAPTURANDO ESTE CÓDIGO EN TU MÓVIL



24/10/2011.



## NOTICIAS

09 / 02 / 2015 | **La CHS saca a información pública el deslinde de la rambla de Biznaga en Lorca**



**El objetivo es delimitar un cauce de 20 kilómetros hasta el río Guadalentín para evitar las inundaciones en el campo lorquino**

La Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) ha sacado a información pública el deslinde de la rambla de Biznaga, en Lorca. El organismo de cuenca considera muy importante ejecutar las obras de delimitación de este cauce para mejorar la evacuación de las aguas procedentes de inundaciones en la gran llanura que se extiende entre Lorca y Puerto Lumbreras. Tras su publicación hoy en el Boletín Oficial de la Región de Murcia, los interesados tienen un mes para presentar alegaciones.

Este deslinde es uno de los proyectos contenidos en el Plan de Defensa del Alto Guadalentín que se puso en marcha a finales de 2012, tras la riada de San Wenceslao. Entonces se produjo el estancamiento de una gran masa de agua procedente de las ramblas de Torrecilla y Béjar que no encontraron salida hacia el desagüe natural de esa zona, la rambla de Biznaga.

La zona sobre la que se va a actuar comprende un tramo de 20 kilómetros, desde la diputación de Campillo hasta la desembocadura en el río Guadalentín, y se hará en las dos márgenes del cauce, parte del cual había desaparecido hace años y transformado en terrenos de cultivo.

La parte más importante de este proyecto es la inicial, donde se registran tradicionalmente los problemas de encharcamiento. Se encuentra entre el paraje conocido como La Retamosa, en Campillo, y la antigua carretera de Águilas. Ese es el tramo en que el cauce original actualmente no existe. De hecho, durante la riada de septiembre de 2012, la rambla de Biznaga funcionó muy bien en su tramo final, pero no en la zona cercana a la autovía Lorca-Águilas, donde no consiguió drenar el agua acumulada. Como consecuencia, una gran zona de unas 9.000 hectáreas entre los municipios de Lorca y Puerto Lumbreras quedó inundada y permaneció empantanada durante bastantes días, con los consiguientes daños en cultivos, ganadería y viviendas.

Desde el Puente del Vado y hasta su desembocadura en el Guadalentín, en la pedanía de Hinojar, la rambla ya adquiere sus características propias y está mejor definida, por lo que no serán necesarias demasiadas modificaciones en ese tramo como consecuencia del deslinde.

*Imagen: Campo de Lorca inundado tras la riada de San Wenceslao en 2012*

Figura 1.2.6: Nota de prensa de la Confederación Hidrográfica del Segura en la que anuncia actuaciones en la Rambla Biznaga, en el que hace referencia al encharcamiento de agua en la riada de septiembre de 2012. CHS 09/02/2015.

REGIÓN DE MURCIA

## Aparece una nueva grieta terrestre en un polígono de Totana

El Ayuntamiento ha pedido a los geólogos que revisen la fisura, de 300 metros de longitud y hasta dos de profundidad, situada en el parque industrial 'El Saladar'

09.11.12 - 14:23 - EFE | MURCIA |



Vídeo: laverdad.es

La Concejalía de Emergencias ha solicitado hoy la urgente presencia de técnicos del Instituto Geológico y Minero de la Unidad de Murcia del Ministerio de Economía y Competitividad para evaluar los motivos de la aparición de "una enorme grieta terrestre" surgida tras las últimas lluvias torrenciales en una parcela del polígono industrial "El Saladar" de Totana, según fuentes municipales.

La grieta se extiende sobre una parcela del parque industrial en dirección a la Ciudad Deportiva "Valverde Reina"; y tiene una longitud de más de 300 metros cuadrados y una profundidad de más de dos metros en algunos tramos, según informan fuentes de Protección Civil.

Las mismas fuentes indican que la grieta apareció hace dos días y se abre de forma progresiva en los últimos días alcanzando una apertura de entre 40 y 50 centímetros en algunas zonas, por lo que el Ayuntamiento va a señalizar la zona con el fin de evitar algún accidente por otros riesgos geológicos en la zona.

El pasado mes de octubre, en la pedanía lumbrerense de El Esparragal, apareció una grieta de 1,5 kilómetros, que salió a la luz tras desaparecer el agua de las inundaciones de septiembre.

Figura 1.2.7: Artículo sobre una grieta en el terreno en el polígono industrial "El Saladar" en Totana. La Verdad 22/10/2014.

## ABC | MURCIA

MURCIA / INUNDACIONES

### Aparece una grieta de 1,5 kilómetros en El Esparragal tras retirarse el agua

El socavón, una línea recta casi perfecta, llega a tener en algunos puntos hasta cinco metros de profundidad

D. M. / MURCIA

Día 18/10/2012 - 18.20h



PACO ALONSO

La retirada del agua que se acumuló en la pedanía de **El Esparragal, en Puerto Lumbreras**, durante las inundaciones de finales de septiembre ha sacado a la luz otro preocupante fenómeno: **una grieta en el suelo** que se extiende a lo largo de **1,5 kilómetros** y que en algunos puntos llega a tener hasta cinco metros de profundidad.

La grieta afecta tanto a viviendas como a explotaciones agrarias. Técnicos de Protección Civil y del **Instituto Geológico y Minero de España** se desplazaron hace unos días hasta el lugar para hacer una primera evaluación, pero aún no hay conclusiones. La zona concreta en la que se sitúa la grieta está próxima a la rotonda de Los Soles, en el núcleo de La Estación. Se trata del área de máxima afección de la riada, **que en ese mismo punto se cobró la vida de tres personas**.

El Ayuntamiento ya ha solicitado a la Comunidad Autónoma y al Instituto de Geología un «**estudio exhaustivo**».

Figura 1.2.8: Artículo sobre una gran grieta en el terreno en El Esparragal (Puerto Lumbreras), tras la inundación de septiembre de 2012. La Verdad 18/10/2012.

### 1.3. Estructura de la memoria

El presente trabajo fin de máster se estructura en 7 capítulos que se describen a continuación:

En el **CAPÍTULO 1** se explica el objetivo general del trabajo y los objetivos específicos del mismo, así como los antecedentes necesarios para describir el contexto.

El **CAPTÍTULO 2** sirve para analizar el estado del arte, abarcando desde los distintos tipos y orígenes de la subsidencia en general, hasta los últimos estudios y trabajos que analizan el fenómeno en el Valle del Guadalentín.

En el **EI CAPÍTULO 3** se describe la metodología aplicada en la investigación objeto de este trabajo.

**EI CAPÍTULO 4** se utiliza para describir la zona de estudio, el Valle del Guadalentín, en cuanto a características socioeconómicas, climatología, hidrología y geomorfología y tectónica.

En el **CAPÍTULO 5** se presentan los resultados obtenidos en la investigación, haciendo especial hincapié en la correlación entre los datos de subsidencia detectada por medios InSAR y las incidencias y patologías detectadas.

En el **CAPÍTULO 6** se sintetizan las conclusiones finales de la investigación.

Por último, en el **CAPÍTULO 7** se plantean futuras líneas de investigación relacionadas con los resultados y conclusiones del presente trabajo fin de máster.

## **CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE**

## **2. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. Subsidencia**

#### **2.1.1. Concepto**

Existen numerosas explicaciones del concepto de subsidencia, a continuación se presenta un extracto de las más interesantes desde el punto de vista de este trabajo.

La Real Academia de la Lengua Española establece la siguiente definición del término de subsidencia desde un punto de vista geológico: "Hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras".

El glosario de Geología publicado por el American Geological Institute la describe como (Prokopovich, 1979).

(a) "Un movimiento de masa local que implica principalmente el asentamiento o hundimiento gradualmente descendente de la superficie sólida de la Tierra, con pequeña o inexistente componente horizontal y que no ocurre a lo largo de una superficie libre. El movimiento no es restringido en velocidad, magnitud, o área implicada. La subsidencia puede deberse a procesos geológicos naturales o actividades del hombre, tales como la extracción de sólidos, líquidos o gases bajo la superficie y la saturación de algunos tipos de depósitos porosos o sueltos poco húmedos".

(b) "Un hundimiento de una gran parte de la corteza terrestre debido a movimientos tectónicos".

Otra definición desde el punto de vista científico es la de Corapcioglu (1984): "La subsidencia implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas".

Poland et al. (1972) definen la subsidencia como "El hundimiento o asentamiento de la superficie terrestre, que pueden ser debidos a alguno de varios procesos. El término, como es usado normalmente, se refiere a los movimientos verticales descendentes de las superficies naturales, aunque pueden presentarse componentes horizontales de pequeña escala. No se incluye a los desprendimientos de tierra, que conllevan desplazamientos horizontales de gran magnitud, ni a los asientos de rellenos artificiales".

Por otra parte, Tomás et al. (2009) establecen las siguientes definiciones:

(a) "La subsidencia del terreno es únicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos subsuperficiales de deformación".

(b) "La subsidencia del terreno es un fenómeno consistente en el hundimiento de la superficie terrestre cuyo origen puede deberse a diversas causas generando cuantiosos daños en aquellas infraestructuras que se asientan sobre ella".

### **2.1.2. Tipos de subsidencia**

A continuación se muestran diversas clasificaciones de los tipos de subsidencia según diferentes autores.

#### **Clasificación de Prokopovich (1979).**

Basándose en datos obtenidos durante varias décadas, clasifica la subsidencia en dos grupos: endógena y exógena (Figura 2.1.1 y Figura 2.1.2).

El primer término se refiere a procesos originados en el interior del planeta, tales como pliegues, fallas, vulcanismo, etc. mientras que el el segundo a procesos originados cerca de la superficie terrestre.

La subsidencia exógena, asimismo, puede subdividirse en subsidencia causada por

eliminación o debilitamiento de la capa soporte y la subsidencia causada por un aumento de la carga real o efectiva. Un caso del primer subgrupo puede ser la relacionada con el descenso de masas de agua no confinadas en el suelo, mientras que como ejemplo del segundo grupo podemos citar la extracción desde sistemas acuíferos confinados de agua, crudo o gas.

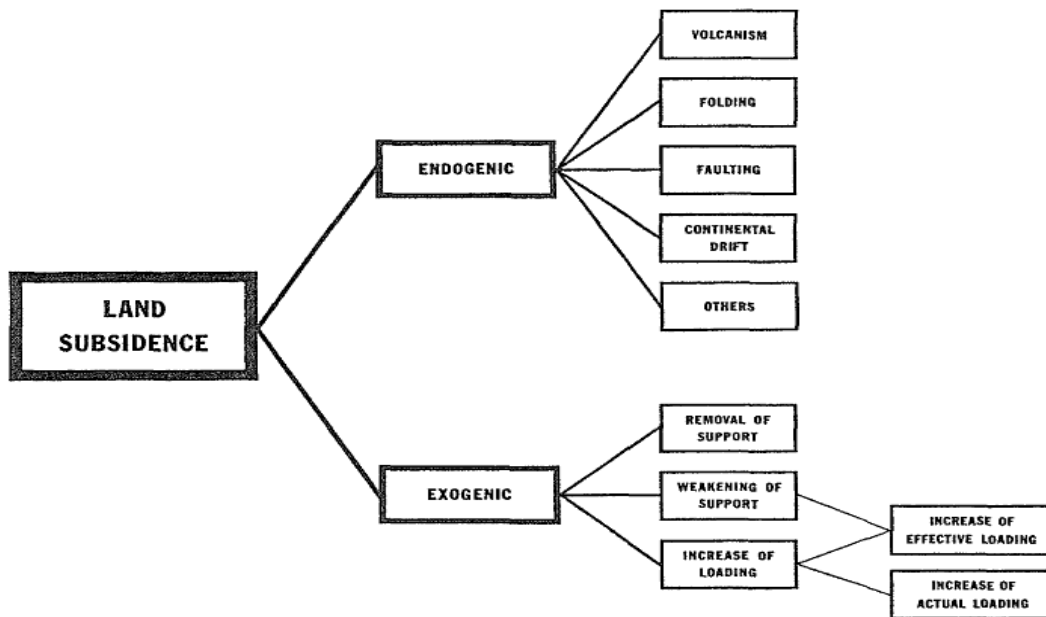


Figura 2.1.1: Tipos de subsidencia. Prokopovich (1979).

SUBSIDENCIA TERRESTRE	EXOGÉNICA	TRASLADO DE SÓLIDOS
		DISMINUCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SUELO
		AUMENTO DE PRESIÓN
		VARIACIONES DE HUMEDAD
	ENDOGENICA	PLIEGUES
		FALLAS
		VOLCANISMO
		TECTÓNICA DE PLACAS
		OTROS

Figura 2.1.2: Tipos de subsidencia. Adaptada de Prokopovich (1979). Extraída de Vázquez (2001).



## **Clasificación de Scott (1979), en función los mecanismos que la desencadenan.**

Entre ellos se encuentran los siguientes:

- Los ajustes de la corteza terrestre.
- La actividad volcánica y tectónica.
- Los terremotos.
- El traslado de sólidos (minerales, carbón) y fluidos.
- Las cargas superficiales.
- La hidrocompactación.
- Destaca la extracción de fluidos desde reservas y manantiales subterráneos, que pueden ser petróleo, agua subterránea, gas o vapor de agua.

## **Otra clasificación según la causas que origina la subsidencia es la de González Vallejo et al. (2002).**

Los autores sostienen que "las subsidencias son generalmente procesos muy lentos, aunque con frecuencia se aceleran por actuaciones antrópicas".

El fenómeno puede afectar a cualquier tipo de terreno, aunque generalmente a suelos, "y son debidos a cambios tensionales inducidos en el terreno, por las siguientes causas".

- Descenso del nivel freático.
- Minería subterránea y túneles.
- Extracción o expulsión de petróleo o gas.
- Explotación intensiva de acuíferos.
- Procesos lentos de disolución y lavado de materiales.
- Procesos morfotectónicos y de sedimentación.
- Procesos de consolidación de suelos blandos y orgánicos.



**Por otra parte, Tomás et al. (2009), presentan la siguiente clasificación para los distintos tipos de subsidencia según la causa que la origina (Figura 2.1.3).**

<b>Por disolución subterránea</b>	En sal
	En yeso
	En rocas carbonáticas
<b>Por construcción de obras subterráneas o galerías mineras</b>	
<b>Por erosión subterránea (tubificación o <i>piping</i>)</b>	
<b>Por flujo lateral</b>	Rocas salinas
	Arcillas
<b>Por compactación</b>	Por carga
	Por drenaje
	Por vibración
	Por extracción de fluidos
	Por hidrocompactación
<b>Tectónica</b>	

Figura 2.1.3: Clasificación de la subsidencia según la causa que la origina. Extraída de Tomás et al. (2009).

### 2.1.3. Importancia del fenómeno de la subsidencia

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente, la subsidencia del terreno es un proceso geológico que supone el asentamiento de la superficie terrestre, por causas que pueden ser naturales o antrópicas.

Durante toda la historia del planeta y en numerosas partes del mismo, se han venido produciendo movimientos de la corteza terrestre, principalmente verticales, y en algunos casos con componente horizontal. La velocidad con la que producen puede variar

desde varios metros hasta unos pocos mm al año. En el primer caso se pueden apreciar asientos de gran magnitud en segundos, mientras que la subsidencia de baja velocidad está asociada a procesos de consolidación del terreno que ocurren durante largos periodos de tiempo, que pueden llegar a miles, incluso cientos de miles de años. Cuanto mayor es la velocidad de movimiento del terreno mayor es la repercusión que puede ocasionar en la actividad humana.

Además de la velocidad, otros aspectos a tener en cuenta son la magnitud de los asientos, que puede variar desde pocos milímetros o centímetros hasta varios centímetros, e incluso metros al año, como ya se ha comentado, así como la superficie afectada por el fenómeno que puede variar desde unos pocos metros cuadrados hasta miles de kilómetros cuadrados.

La subsidencia se comenzó a considerar como uno de los fenómenos geológicos preocupantes para los seres humanos durante el siglo XX, ya que el incremento de la población experimentado desde los comienzos de la era industrial puso de manifiesto dos aspectos importantes del mismo: por una parte al aumentar tanto el número de núcleos de población como los habitantes de los ya existentes, se incrementó también el porcentaje de habitantes afectados por los procesos de subsidencia originados por causas naturales, por otra parte el aumento de población y la industrialización conllevan un incremento exponencial del consumo de agua, y por lo tanto una mayor necesidad de uso de recursos hídricos, incluida la explotación intensiva de acuíferos, lo que tiene como consecuencia un aumento del número y superficie de zonas afectadas por subsidencia originada por causas antrópicas, que generalmente se asocia con la explotación de los recursos hídricos subterráneos, agravando además las consecuencias del proceso.

Por todo lo anterior, se puede considerar la subsidencia como una consecuencia más de los cambios medioambientales globales que afectan a los ecosistemas del planeta, desarrollados a partir del siglo XX, como resultado del incremento de la población, la proliferación de urbanizaciones en grandes áreas y el desarrollo de la industrialización.

A partir de los años 50 del siglo XX se comienza a tratar la subsidencia como uno de los riesgos geológicos de relevancia mundial, debido al importante incremento de los casos de subsidencia causada por la acción del hombre y las consecuencias sociales y económicas que supone.

Como ejemplo de los efectos de la subsidencia podemos citar los siguientes: modificaciones significativas de los gradientes de los arroyos naturales, así como de canales y drenajes artificiales, llegando incluso a la inversión del sentido del flujo del agua en las acequias y canales de riego, o el colapso de estribos y pilas de puentes, asentamientos en autovías, carreteras y vías de ferrocarril, roturas en canalizaciones de abastecimiento y saneamiento de agua, grietas y filtraciones en presas, y por supuesto, modificaciones en la cartografía y topografía del terreno, con las correspondientes alteraciones en las zonas de inundabilidad, con los riesgos que ello conlleva.

Son especialmente dañinos los efectos de la subsidencia de origen antrópico en áreas extensas, cuando se presenta en forma de asentamientos diferenciales en las zonas urbanas ya que conlleva importantes patologías en la estructura y demás elementos constructivos de las edificaciones, además de daños a las instalaciones y los pavimentos urbanos.

Sin embargo, la subsidencia asociada a procesos geológicos naturales, que se desarrolla a velocidades mucho más lentas, no tiene tanta incidencia a corto o medio plazo. "Los daños causados por estos procesos suelen estar muy localizados, y generalmente consisten en (Suárez y Regueiro, 1997):

- Destrucción y daños por asentamientos diferenciales y grietas en el terreno.
- Invasión del agua sobre las zonas bajas junto a mares, ríos o lagos.
- Pérdidas y filtraciones en embalses.
- Cambios en el flujo de agua en canales, drenajes, desagües, etc.
- Colapso de tuberías de pozos de agua y petróleo.

También se deben considerar otras consecuencias, que si bien no son apreciables a simple vista, por desarrollarse en el subsuelo, no por ello carecen de importancia, tales

como las que afectan a las características hidrogeológicas del subsuelo, ya que se producen modificaciones en las presiones intersticiales y efectivas del terreno, resultando nuevos valores de presiones de pre-consolidación, modificando los parámetros de almacenamiento específico de acuíferos y cambiando, por tanto las características y comportamiento futuro del terreno.

En algunas ocasiones se pueden obtener beneficios de los efectos de la subsidencia provocada voluntariamente por el hombre, como la creación de lagos artificiales, como es el caso del Lago de Texcoco, cerca de Ciudad de México (Figura 2.1.4).



Figura 2.1.4: Panorámica del Lago Texcoco: Fuente: Tomás Filsinger, 2006.

Al finales de los años 60 del siglo XX, dentro del Proyecto del Lago de Texcoco se hicieron investigaciones detalladas (Herrera et al., 1977) para construir un lago artificial al norte de Ciudad de México mediante subsidencia provocada a través de la extracción de grandes cantidades de agua.

Primero se realizó un experimento en una unidad arenosa de los depósitos lacustres instalando una red de pozos de gran capacidad de extracción que, tras un período de diez meses de bombeo continuo (desde octubre de 1967 hasta julio de 1968), dieron como resultado una subsidencia de 3 m.

Posteriormente se aplicó el procedimiento para la construcción de cuatro lagos artificiales con la principal finalidad de proteger de las inundaciones.

A diferencia de los movimientos sísmicos, la subsidencia no implica riesgo inmediato para la vida de las personas, sin embargo puede llegar a suponer importantes daños materiales con las correspondientes pérdidas económicas, especialmente y como ya se ha comentado en zonas urbanas, "afectando especialmente a todo tipo de construcciones apoyadas sobre el terreno que se deforma" (Tomás et al., 2009).

En 1975 la UNESCO promovió la creación de un grupo de trabajo para el estudio de la subsidencia en el mundo, lo que ha dado lugar a la celebración periódica del SIMPOSIO INTERNACIONAL DE SUBSIDENCIA DEL TERRENO, la octava edición del evento se celebró en la ciudad mexicana de Santiago de Querétaro en 2010 y la novena está prevista para noviembre de 2015 en la ciudad japonesa de Nagoya (<http://www.nisols2015.com/>).

Durante los últimos años, tanto para la identificación de las áreas afectadas, como para la determinación de las causas, y la caracterización de los efectos, han resultado de especial utilidad y relevancia los nuevos métodos de observación y monitorización tales como el uso de técnicas de radar interferométrico de apertura sintética (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR), o los sistemas globales de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS).

Teniendo en cuenta que el objetivo es evitar o minimizar los posibles daños que pueda provocar el fenómeno de la subsidencia, resulta especialmente importante tanto la identificación y caracterización de las áreas afectadas, como la determinación de las causas principales de la misma, lo que podría permitir la adopción de las medidas

necesarias para evitar y/o minimizar los riesgos derivados, en los que por otra parte, como en toda evaluación de riesgos se deben tener en cuenta tanto la probabilidad de ocurrencia, como la gravedad de las consecuencias, en su caso.

A continuación se muestra un resumen de las posibles causas de subsidencia extraídas de las clasificaciones anteriores, agrupadas en naturales, antrópicas o mixtas (Figura 2.1.5).

	Prokopovich (1979)	Scott (1979)	Vallejo et al., (2002)	Tomás et al., (2009)
<b>Causas naturales</b>	Traslado de sólidos Disminución de la resistencia del terreno Fallas Pliegues Volcanismo Tectónica de placas	Los ajustes de la corteza terrestre La actividad volcánica y tectónica Los terremotos	Procesos lentos de disolución y lavado de materiales Procesos morfotectónicos y de sedimentación.	Por flujo lateral (rocas salinas, arcillas) Tectónica Disolución subterránea (en sal, en yeso, en rocas carbonáticas)
<b>Causas naturales/Actividad antrópica</b>	Aumento de presión Variaciones de humedad	Las cargas superficiales	Descenso del nivel freático Procesos de consolidación de suelos blandos y orgánicos.	Por erosión subterránea (tubificación o "piping")
<b>Actividad antrópica</b>		La hidrocompactación El traslado de sólidos (minerales, carbón) y fluidos La extracción de fluidos desde reservas y manantiales subterráneos, que pueden ser petróleo, agua subterránea, gas o vapor de agua.	Minería subterránea y túneles. Extracción o expulsión de petróleo o gas Explotación intensiva de acuíferos.	Compactación (por carga, por drenaje, por vibración, por extracción de fluidos, por hidrocompactación) Por construcción de obras subterráneas o galerías mineras

Figura 2.1.5: Resumen de causas de subsidencia según origen natural o antrópico.

En el primer grupo se encuadran las distintas causas de subsidencia, según las clasificaciones de los diferentes autores, que podrían ser atribuidas a causas naturales,

por lo que las actuaciones posibles del hombre para evitar o minimizar riesgos pueden ser tanto la realización de estudios y predicciones de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, como acciones preventivas respecto a las posibles consecuencias en construcciones y/o actividades a realizar en las zonas afectadas.

El último grupo se refiere a causas originadas por la actividad humana, por lo tanto es posible, además de las acciones comentadas en el caso anterior, la adopción previa de políticas preventivas que reduzcan la probabilidad del riesgo de subsidencia causada por el hombre, que generalmente está relacionada con la explotación intensiva de acuíferos confinados.

Por último, encontramos un grupo de causas, que pueden deberse tanto a la naturaleza como a la acción del hombre, como por ejemplo las cargas superficiales, que se pueden originar bien por la implantación de construcciones, bien por la sedimentación y/o desplazamiento de terreno, o los descensos de nivel freático, que se pueden deber tanto a variaciones naturales de las condiciones climatológicas como a la explotación de acuíferos, etc.

En cualquier caso debemos tener en cuenta que la subsidencia generalmente no se produce por un sólo motivo, sino que suelen ser varias las causas y fenómenos que producen la subsidencia del terreno, independientemente de que alguno de ellos tenga una influencia preponderante.

#### **2.1.4. Subsidencia originada por la extracción de agua desde acuíferos confinados**

##### **2.1.4.1. Principios generales**

La extracción de agua desde acuíferos confinados es una de las causas originadas por el hombre que más incidencia tienen en el fenómeno de la subsidencia, además de ser un fenómeno que se viene produciendo en el caso concreto del Valle del Guadalentín, objeto principal de este trabajo.

Según Custodio y Llamas (1983) un acuífero, o embalse subterráneo, es “aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades”. Resultando novedosa para esa época la connotación económica de dicha definición.

A continuación se describen algunos conceptos hidrogeológicos necesarios para comprender el comportamiento de las distintas formaciones geológicas en función de su capacidad de almacenar y transmitir el agua (Molinero, 2005):

- a) Acuíferos (del latín “aqua”=agua y “fero”= llevar), que son formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir agua.
- b) Acuitardos (del latín “tardare”= retardar), que son aquellas formaciones semipermeables que, conteniendo agua incluso en grandes cantidades, la transmiten muy lentamente.
- c) Acuicludos (del latín “claudere”= cerrar), que consisten en aquellos estratos o formaciones porosas pero impermeables y que, por lo tanto, pueden almacenar agua pero no la transmiten a su través.
- d) Acuífugos (del latín “fugere”=huir), que serían rocas con porosidad nula y, por lo tanto, incapaces de almacenar y transmitir agua.

Por otra parte, desde un punto de vista meramente hidráulico existen tres tipos de acuíferos (Molinero, 2005):

- a) Los acuíferos confinados (o cautivos), son formaciones geológicas completamente saturadas de agua, que están rodeados tanto por arriba como por debajo por estratos impermeables. Por lo tanto, en este caso el agua del acuífero está sometida a una presión de confinamiento generalmente superior a la atmosférica.



b) Los acuíferos no confinados (libres) que no están rodeados por estratos impermeables y el nivel superior de saturación se encuentra a presión atmosférica.

c) Los acuíferos semiconfinados que corresponden a situaciones similares a las que presenta un acuífero confinado pero con la particularidad de que el estrato confinante corresponde a un acuitardo, en lugar de a un acuífugo o acuicludo, por lo tanto pueden recibir una cierta recarga a través de la capa semipermeable que los confina.

El agua que se extrae de un acuífero confinado no proviene del vaciado de la porosidad, ya que el estrato confinado permanece constantemente saturado de agua, que está sometida a las sumas de las presiones hidrostática, litostática y atmosférica, por lo tanto al perforar un acuífero confinado el agua ascenderá rápidamente por el pozo hasta alcanzar el nivel piezométrico del acuífero en ese punto, como consecuencia de la descompresión del agua intersticial y de la compresión o consolidación del terreno debido al descenso en la presión del agua.

Así pues, cuando se extrae agua de un depósito confinado se está reduciendo la presión intersticial ( $u$ ) y por consiguiente bajando el nivel piezométrico. Como el acuífero sigue teniendo la misma columna litológica encima (el mismo peso y por lo tanto tensión total,  $\sigma_T$ ), se produce un aumento de la tensión efectiva ( $\sigma_e$ ) que genera la consolidación del acuífero con la consiguiente reducción de la porosidad. El incremento de tensiones efectivas por reducción de la presión intersticial se expresa matemáticamente a través del principio de Terzaghi (ver esquema en Figura 2.1.6):

$$\sigma_e = \sigma_T - u \quad (1)$$

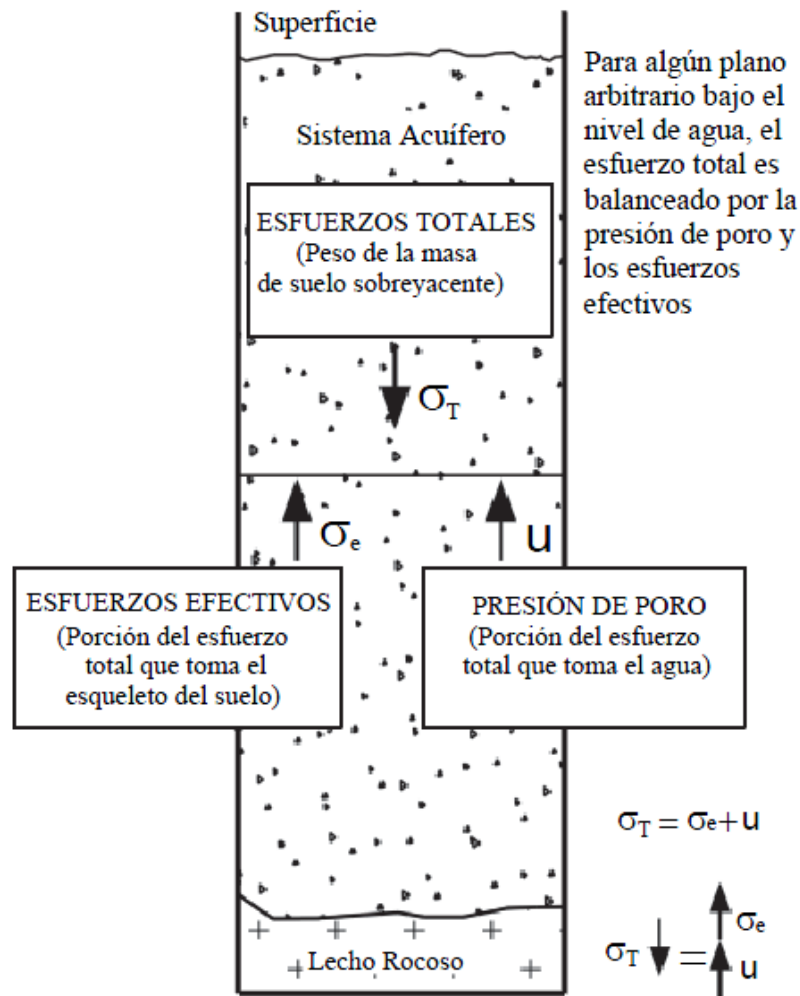


Figura 2.1.6: Esquema del principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi. Extraída de Pacheco (2007).

Terzaghi (1956), formuló la teoría de la consolidación unidimensional, que aunque fue desarrollada con otros fines, también se puede aplicar en el estudio del fenómeno de la subsidencia. Una de las hipótesis de la teoría es que la disminución del volumen de la masa de suelo provocada por la extracción de agua del subsuelo es igual al volumen de agua drenado.

La teoría de Terzaghi se cumple únicamente cuando el acuífero está totalmente saturado, cuando el acuífero es libre esta teoría no tiene validez.

La consolidación por la sobreexplotación del acuífero es lo que denominamos subsidencia causada por la extracción de agua de un acuífero confinado.

También habría que tener en cuenta el factor de descompresión del agua, aunque el agua tiene un módulo de compresibilidad muy pequeño, ya que al perforar el acuífero y conectarlo con la atmósfera se produce un aumento de volumen del agua.

En los acuíferos libres también se pueden dar fenómenos de subsidencia debido al aumento de las tensiones efectivas por la explotación del agua. En el drenaje de un acuífero libre no se cumple la teoría de consolidación de Terzaghi, no obstante la subsidencia tiene lugar porque el terreno pierde parte de la presión hidrostática intersticial y la fracción sólida de suelo se ve expuesta a mayores tensiones reorganizándose la estructura del mismo, adquiriendo mayor compacidad.

#### **2.1.4.2. Casos registrados de subsidencia por sobreexplotación de acuíferos**

Son numerosos los casos registrados, a lo largo de la historia, de subsidencia por todo el planeta.

A continuación se exponen algunos de los casos más relevantes de subsidencia debida a la extracción de agua del terreno que han registrado a lo largo de la historia.

Se presentan también los resultados de los estudios científicos y la experimentación del fenómeno basados en modelos físicos.

La subsidencia debida a la sobreexplotación de agua subterránea ha sido constatada desde principios del siglo XX, en países como Estados Unidos, Japón, Italia, China, y México entre otros muchos.

En la actualidad en cualquier país en el que se realice una intensa explotación del agua subterránea de sistemas acuíferos formados por rellenos granulares geológicamente recientes, tiene partes en las que aparece, en mayor o menor medida el fenómeno de la

subsidencia.

El primer agrietamiento documentado y estudiado se data de finales de los años 20 del siglo pasado en la zona de la localidad de Picacho, en el Centro-Sur de Arizona (Carpenter, 1999). La zona en cuestión se caracteriza por ser una cuenca rellena con material aluvial con un potencial de consolidación alto, rodeado de montañas de origen ígneo y metamórfico y con una sobreexplotación del agua del subsuelo, se tienen fotografías que muestran que el agrietamiento existió al menos desde 1927 (Figura 2.1.7).



Figura 2.1.7: Fotografía de agrietamiento aparecido en el Sur de Arizona tomada en el otoño de 1927. Extraída de Carpenter (1999).

Respecto a los hundimientos de mayor magnitud que se hayan generado por efecto de la sobreexplotación del agua subterránea. En el Valle de San Joaquín en California, se

encuentra la zona con los hundimientos de mayor magnitud registrados en Estados Unidos los cuales fueron observados por primera vez en 1935 (Galloway y Riley, 1999). Una zona en particular, cercana a la localidad de Mendota, había desarrollado los hundimientos más grandes medidos en Estados Unidos, en 1970 los hundimientos habían alcanzado poco más de 9,0 metros (Poland y Lofgren, 1984).

También se han conocido casos de menor repercusión que se han producido en Taipei (Taiwan), Londres (Inglaterra) o Las Vegas (EE.UU.).

#### **2.1.4.3. La subsidencia en México D.F. como ejemplo de subsidencia provocada por sobreexplotación de acuíferos**

##### **Presentación del caso.**

El caso de ciudad de México D.F. es un referente en los efectos de la subsidencia en el mundo, siendo la extracción de agua desde los acuíferos infrayacentes la principal causa desencadenante.

Actualmente el área metropolitana de ciudad de México, es una de las más pobladas del mundo, con más de 20 millones de habitantes, también es una de las regiones del mundo donde mayores valores de subsidencia se han medido.

México D.F. está situada en el extremo suroeste de un gran cuenco cerrado que forma el llamado Valle de México, ubicado en la parte sur de la parte más alta de la altiplanicie central mexicana. Los sistemas montañosos que delimitan dicho valle datan de finales del Mesozoico y se corresponden con la fase Andina de la orogenia Alpina, como consecuencia se produjo a continuación un periodo de intensa actividad volcánica durante el Mioceno y hasta principios del Pleistoceno, que originó las altas cumbres volcánicas, que como se ha comentado delimitan el valle.

Durante la segunda parte del Pleistoceno y durante el Holoceno la actividad volcánica ha disminuido considerablemente, aunque no ha cesado del todo, como lo muestra la

corriente de lava basáltica del Pedregal, cuya edad se calcula en unos 2000 años, y que ha recubierto, al pie de la sierra de Ajusco, restos de las civilizaciones arcaicas de los pueblos primitivos establecidos a orillas del lago de Texcoco.

La actual configuración cerrada del valle data de su origen a finales del Mioceno. Anteriormente esta alta y extensa meseta estaba abierta al norte y al sureste, pero ambas salidas hacia las actuales vertientes de los ríos Tula y Grande, respectivamente, se cerraron con los productos piroclásticos de las erupciones de los volcanes que lo rodean.

Durante el Plioceno casi todo el actual valle estuvo ocupado por las aguas de un extenso lago, cuya superficie, que se calcula alcanzaba un nivel de 26 m por encima del actual del lago Texcoco, ha ido reduciéndose hasta que en el Holoceno quedó dividido en una serie de lagos de menor importancia y extensión de los que hoy en día sólo quedan unos pocos.

Por lo tanto, la ciudad de México D.F. situada en la parte sur del Valle de México, en una cuenca endorreica de unos 9600 km<sup>2</sup>, situada a 2250 m, con un contorno irregular, alargado de norte a sur, con aproximadamente 125 km de largo y 75 km de ancho (Díaz-Rodríguez, 2006). La cuenca está rodeada por montañas, y anteriormente estuvo ocupada por varios lagos (Figura 2.1.8) hasta la conquista española, tras la cual se reconstruyó la ciudad aplicando los conceptos europeos de la época, muy diferentes de los de los anteriores pobladores, que habían prevalecido desde la creación de la ciudad original, especialmente en cuanto al uso e integración de los lagos en el entorno urbano, provocando por tanto la desecación de los lagos, principalmente el de Texcoco. En el año 1524, según Fray Toribio de Benavente, "los lagos iniciaron un descenso continuo en el nivel de las aguas", proceso que continuó hasta la desecación, casi total, de los mismos durante el siglo XX. Las causas principales fueron el abandono progresivo de las acequias, la proliferación muros para el control de las inundaciones y la construcción del desagüe general de la cuenca.



Figura 2.1.8: Representación artística de la ciudad de México-Tenochtitlán en el año 1519. Fuente: Filsinger, 2006.

La mayor parte de la dotación de agua doméstica e industrial del área metropolitana de México D.F. proviene principalmente de los recursos subterráneos. Una gran parte se obtiene de un depósito extensivo de material aluvial que conforma un acuífero granular semiconfinado del Terciario, bajo un acuitardo compuesto de sedimentos del Cuaternario altamente compresibles y con una alta porosidad, entre 60 y 90%, y de espesor variable entre 10 y 100 m, con una cantidad importante de arcilla y un alto porcentaje de materia orgánica.

Prácticamente, la totalidad de la ciudad se localiza en una llanura lacustre, dentro de la cuenca, rodeada por montañas volcánicas. Se trata de una cuenca hidrológicamente cerrada, que hasta finales del siglo XVIII estuvo ocupada por una serie de lagos interconectados, hasta la construcción de un sistema de drenaje artificial.

Actualmente existe una red de canales superficiales que drenan las aguas pluviales y las pérdidas de las redes de abastecimiento, hacia el principal canal de drenaje, situado en el norte de la región. Además, se han añadido un conjunto de túneles profundos para conducir los incrementos de caudal, necesarios debido al incremento progresivo de la extracción de agua subterránea local, mediante la introducción de agua adicional desde otras reservas necesarias para atender la creciente demanda.

Como se ha comentado, la región se caracteriza por ser relativamente plana, y en lo que se refiere a aspectos geotécnicos se divide en tres zonas: la zona de lago, la zona de transición y la zona de terreno duro (Figura 2.1.9).

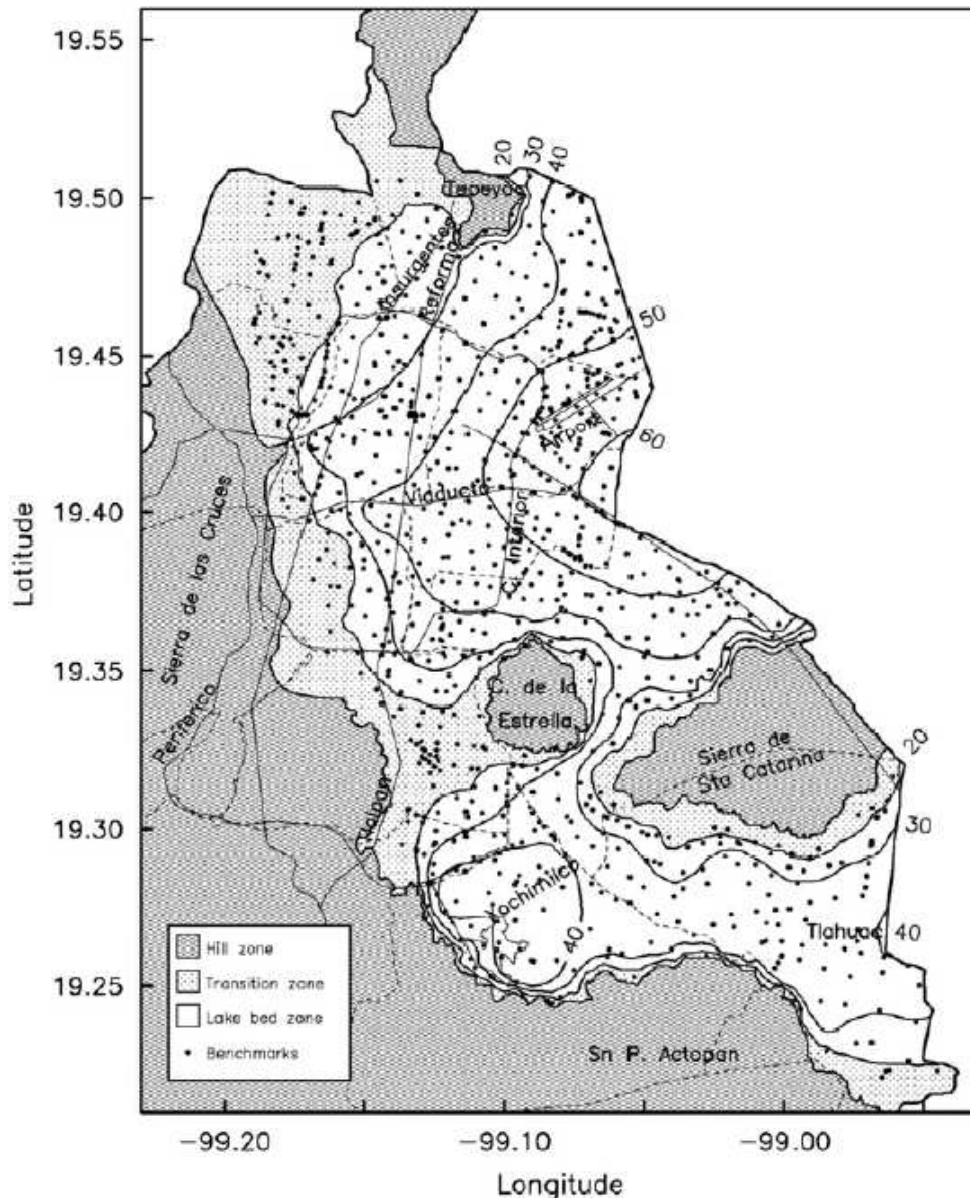


Figura 2.1.9: Curvas de profundidad del suelo compresible hasta el lecho rocoso en el valle de México en 2005. Avilés et al. (2010).

El problema de la subsidencia en México D.F. provocada por la explotación del agua subterránea comenzó durante el siglo XIX, descubriéndose en 1925, por Roberto Gayol, autor del proyecto y director de las obras del alcantarillado de Ciudad de México.

Gayol fue culpado en 1924 del hundimiento de la estructura hidráulica de San Lázaro,



situada en la cabecera del principal canal de la ciudad, sin embargo, fue capaz de demostrar, ante la Asociación de Ingenieros y Arquitectos de Ciudad de México, que la causa del hundimiento era el descenso generalizado del fondo del valle, para lo cual recurrió a la comparación de dos nivelaciones de precisión de un monumento localizado cerca de la Catedral, tomadas con aproximadamente 50 años de diferencia, en 1877 y 1924. Gayol atribuyó el fenómeno al efecto drenante del sistema de saneamiento recién construido.

La primera referencia bibliográfica del fenómeno en publicaciones geotécnicas se produjo en 1936, a cargo del ingeniero civil José Antonio Cuevas. Debido al rápido crecimiento de la ciudad de México en los años 30 del siglo XX, se produjo un gran incremento de la demanda de agua, que se obtenía principalmente del subsuelo de la región, agravándose los problemas relacionados con el descenso del terreno. En 1948, el ingeniero Nabor Carrillo demostró, basándose en la Teoría de Consolidación de Terzaghi, que la subsidencia de la ciudad se debía a la extracción de agua subterránea desde los acuíferos situados a profundidades entre 30 y 50 m para usos doméstico, industrial y municipal (Figuerola, 1977). El asiento se produce por el descenso en la presión del agua debido a la extracción de la misma mediante bombeo, especialmente intensiva en el centro de la ciudad, de forma que los caudales de extracción superaban a los de recarga del acuífero. El descenso de la presión intersticial produce el incremento de la tensión efectiva del terreno que provoca una reorganización interna de su estructura reduciéndose el índice de huecos y provocando los asientos.

### **Seguimiento hidrológico y geotécnico.**

En un principio el agua se proporcionaba por los manantiales localizados en la zona inferior de las montañas, al oeste de la ciudad. En 1860 se perforó el primer pozo profundo para suministrar agua a una piscina pública y a partir de entonces se generalizó el bombeo en toda la zona. En 1890 desaparecieron las fuentes más cercanas, situadas en el bosque de Chapultepec. Es probable que el descenso del nivel piezométrico y la subsidencia empezaran por la misma fecha. A principios del siglo XX todos los pozos de la ciudad eran artesianos.

La Comisión Hidrológica del Valle de México (C.H.M.V.), autoridad responsable de los recursos de agua, comenzó en 1950 la instalación de una red de más de 300 piezómetros que se extendían por toda la llanura lacustre, y cuya situación fue estudiada especialmente para proporcionar información sobre la variación de la presión del agua en los poros de los sedimentos. Se establecieron seis niveles diferentes de supervisión, cuyas profundidades variaban entre la proximidad a la superficie y unos 100 m. Estos grupos de piezómetros, muchos de los cuales aún funcionan en la actualidad, han proporcionado una información histórica de incalculable valor acerca de los cambios en la presión intersticial del acuitardo.

Al mismo tiempo, durante los años 50, se realizó una profunda investigación para hallar las características físicas de los sedimentos lacustres. Se determinó la compresibilidad y el contenido volumétrico de agua, resultando ambos con valores muy altos, por lo que fueron los causantes de una capacidad potencial de asiento sin precedentes.

### **Registros y consecuencias de la subsidencia.**

Carbognin et al. (1978) mantienen que en el período entre 1854 y 1959 se produjo una subsidencia máxima de 750 cm debido a un descenso del nivel piezométrico de 35 m, de donde resulta una ratio entre asiento de subsidencia y variación del nivel piezométrico,  $s/(-\Delta h)$ , de 21,43 cm/m. Ricceri y Butterfield (1974) dan un promedio de 16 cm/m para dicho cociente. La subsidencia ha sido cuantificada con nivelaciones de precisión que arrancan de 1891 (Figueroa, 1977). Desde 1952 estas nivelaciones se han extendido a toda la superficie de la ciudad. Como media, la parte más antigua tuvo una tasa de subsidencia de 4,5 cm/año de 1891 a 1938, 7,6 cm/año de 1938 a 1948, con máximos de 44 cm/año de 1948 a 1950 y 46 cm/año de 1950 a 1951, correspondientes a una bajada del nivel piezométrico de 3 m/año (Scott, 1979). En esta fecha el bombeo llega a su cenit de 9 m<sup>3</sup>/s y se mantiene estable hasta 1970.

Otra forma de estudio de la subsidencia consiste en el recuento y análisis de los casos más sobresalientes en cuanto a daños y asientos en las diferentes partes de la ciudad. En general coinciden las zonas donde se ha medido la máxima subsidencia con

aquellas en la que hay una mayor profusión de casos. El máximo asiento se ha observado en los límites de la ciudad más antigua y su valor supera los 850 cm, lo que no significa, sin embargo, que sea el extremo absoluto. Bouwer (1977) apunta un asiento de 800 cm entre 1938 y 1968. Como promedio, desde 1960 la subsidencia ha alcanzado más de 300 cm en el área metropolitana completa (Scott, 1979).

La construcción de nuevas fuentes de agua para el abastecimiento de la ciudad y las restricciones del bombeo por parte de la legislación en el centro de Ciudad de México redujeron la dependencia de los pozos, lo que hizo que la tasa de subsidencia descendiera considerablemente, disminuyendo a 5 cm/año en los años setenta. En cuanto al área total ocupada por la ciudad, también ha sido disminuida la máxima tasa de subsidencia de 14 cm/año correspondiente al período 1952-59 a 6 cm/año en 1970-73.

Los problemas causados por la subsidencia son de varios tipos: daños en edificios, cimentaciones, pavimentos, sistemas de transportes e instalaciones como redes de agua corriente y saneamiento. Sin embargo, el más importante podría ser el derivado de una posible inundación de la ciudad por las aguas del alcantarillado. Esta agua ahora tiene que ser bombeada al canal principal, que se encontraba inicialmente bajo el nivel general de la ciudad. Aunque el riesgo ha disminuido por la mencionada construcción de túneles profundos de alcantarillado, aún sigue existiendo, pues el canal principal se mantiene en servicio. Además, la subsidencia futura podría llegar a poner en peligro al conjunto de túneles profundos, e incluso al metro.

En cuanto a la repercusión sobre la edificación, hay que añadir continuamente escalones a los edificios pilotados al quedar separados del terreno. Incluso se colocan gatos entre el pilote y los pilares para ir bajando la construcción a medida que asienta la superficie del suelo. Un ejemplo de edificio con grandes asientos, a pesar de los recalces realizados, es el Palacio de Bellas Artes, donde la planta baja se ha convertido en planta sótano, debido al descenso del edificio respecto al nivel de la calle (Jiménez Salas et al., 1980; Jaramillo, 1997).

#### **2.1.4.4. La subsidencia en Arizona**

En este apartado se van a presentar principalmente los resultados del trabajo "Land subsidence and earth fissures in Arizona", por resultar muy interesantes para el estudio de investigación que se está realizando, especialmente en lo que se refiere a las grietas que aparecen en el terreno como consecuencia de la subsidencia del terreno, y cuyo esquema de formación se puede ver en la Figura 2.1.14.

El hundimiento del terreno y las grietas forman parte del paisaje del sur y del centro de Arizona desde hace, por lo menos, 70 años.

La expansión urbana y el incremento de las tierras de cultivo, antes desérticas, han tenido un impacto muy perjudicial en forma de hundimiento del terreno y grietas.

En este sentido, la legislación promulgada en Arizona se ha dirigido a la identificación y divulgación pública de las grietas aparecidas en el terreno con la intención de mitigar los riesgos que suponen, mediante la elaboración de mapas de las mismas (Figura 2.1.10).

Es importante saber dónde se encuentran las grietas, así como dónde se prevé su aparición, además de predecir cómo evolucionan y la rapidez con que se propagan, y por supuesto, cuál es el impacto en estructuras, infraestructuras (Figura 2.1.11), etc. y qué soluciones de ingeniería se pueden aplicar para reducir los riesgos, para la salud humana y la seguridad.

Mientras continúe la minería subterránea, la subsidencia del terreno y las grietas seguirán amenazando a los habitantes en Arizona.

Estos riesgos geológicos producen daños en estructuras diseñadas y construidas para albergar, servir y proteger a la población, así como la infraestructura pública incluyendo carreteras, presas, canales, puentes y servicios públicos.

A continuación se detallan algunos ejemplos específicos de daños y amenazas a la

seguridad humana:

- Base de la Fuerza Aérea Luke y Alrededores (1992). Inversión del flujo de drenaje del canal con resultado de 100 viviendas inundadas, cierre de la base durante 3 días, y cerca de 3 millones de dólares en daños.
- CAP Canal en Scottsdale (1999-2006). Hasta 1,5 pies de subsidencia amenazando la capacidad máxima de flujo del canal, lo que da como resultado un aumento de revestimiento de canales, durante muchos años, a un coste de más de 1 millón de dólares.
- Loop 202 Red Mountain Autopista (2006). Grieta que cruza la autopista con un coste de 200.000 dólares, y no se tiene la seguridad de que las medidas tomadas funcionen..
- Residencias Foothills, Montañas Santan (2006-2007). Las grietas se abrieron casi instantáneamente después de las tormentas, abriendo huecos peligrosos en patios residenciales, desmoronamiento calzadas, exponiendo los servicios subterráneos, y desestabilizando las tierras adyacentes.
- McMicken Dam (2003-2006) – Grietas en el terreno descubiertas cerca de la presa, lo que requiere eliminación o sustitución de una parte de la presa con un coste de varios millones de dólares.

Según la ALSG (The Arizona Land Subsidence Group) estos problemas son reales y es sólo cuestión de tiempo que pasen de molestias y costes económicos a víctimas humanas en forma de lesiones o muerte (el 21 de julio 2007, la reactivación de la infame Y-grieta cerca de Queen Creek fue responsable de la muerte de un caballo que cayó en la grieta que se había ampliado rápidamente).

Actualmente, los geólogos e ingenieros carecen de herramientas de campo adecuadas o métodos analíticos para determinar dónde aparecerá una grieta o cuándo esa grieta erosionará o se agrandará (tal vez durante la noche) en un abismo peligroso. En la

actualidad, la única estrategia de mitigación es saber exactamente donde las están las grietas para poder evitarlas. Esto no siempre es posible, sin embargo, y, lo que es más importante, no se hace nada para abordar el peligro en las estructuras preexistentes.

Las medidas de mitigación son en su mayoría empíricas, no probadas, y, además, no evalúan los riesgos (Figura 2.1.12).

Es importante la evaluación de riesgos y estrategias de mitigación para proteger las instalaciones de los daños, y por ello se debe investigar y desarrollar.

La ALSG ofrece las siguientes recomendaciones para abordar estas cuestiones:

1. Fomentar la investigación de los procesos que causan movimientos horizontales, tensión, grietas, y fisuras mediante el establecimiento de centros de investigación de subsidencia y grietas en las universidades estatales de Arizona.
2. Establecer un programa de seguimiento a largo plazo para rastrear la aparición, evolución y distribución de hundimientos y grietas.
3. Crear una red que permita integrar las fuentes en línea interoperables para los datos y nuevas estrategias para el manejo de riesgos relacionados con el hundimiento.
4. Colaborar con los estados vecinos que están experimentando problemas similares. Las estrategias de mitigación recomendadas para el Valle de Las Vegas pueden proporcionar información valiosa para Arizona.
5. Integrar nuevos conocimientos de hundimientos y grietas en publicaciones y cartografía. Se necesita una investigación científica dedicada a comprender los procesos de subsidencia y de las grietas del terreno y desarrollar prácticas de ingeniería para identificar y mitigar los riesgos asociados. Arizona necesita líderes locales y estatales gubernamentales, líderes empresariales, y los activistas de la comunidad deben dar un paso adelante y aceptar un papel de liderazgo. En la actualidad, lo mejor que la geociencia puede hacer por la comunidad es aconsejar contra la construcción cerca de las grietas en el terreno, lo que perjudica a los propietarios de tierras y casas, cuyas propiedades están perdiendo valor por la presencia cercana de grietas en sus propiedades (Figura 2.1.13).

6. Investigación y recopilación de datos para ofrecer las mejores esperanzas para óptima utilización del terreno, y proteger de una manera racional las instalaciones y los bienes de propiedad de los ciudadanos de Arizona.

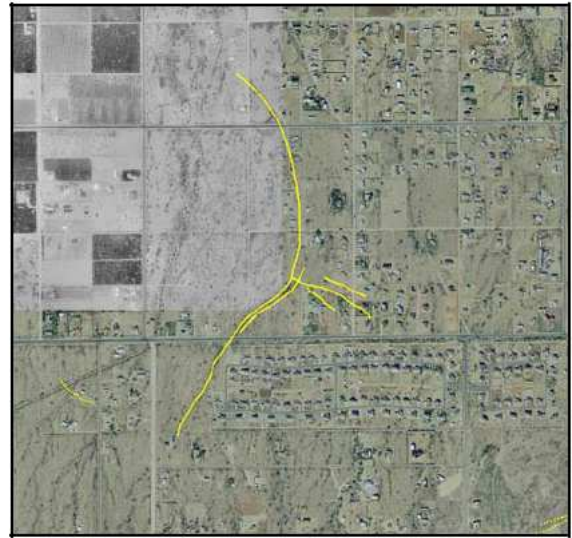


Figura 2.1.10: Fotos aéreas de grietas (resaltadas) en el Chandle Área de Heights. Se advierte crecimiento residencial adyacente. Fuente: Ray Harris.



Figura 2.1.11: Fisura cruzando debajo de una conducción de minería en Nevada. Fuente: AMEC presented in 2004 ADOT workshop.





Figura 2.1.12: Trabajos de mitigación de grieta en el terreno en la carretera en el condado de Pinal County, AZ: Fuente: Ken Euge.



Figura 2.1.13: Grieta que reabrió agosto 2005 cerca de las residencias al sur de Queen Creek, Arizona. Fuente: Mike Schaffer.



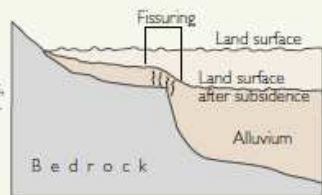
## Fissure formation

Several theories explain the mechanism of fissure formation

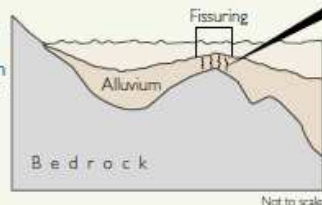
Several mechanisms have been proposed for earth fissures, the most widely accepted of which is differential compaction. As ground-water levels decline in unconsolidated alluvial basins, less compaction and subsidence occurs in the thinner alluvium near the margin of the basin than in the thicker alluvium near the deeper, central part of the basin. The tension that results from the differential compaction stretches the overlying sediment until it fails as a fissure.

### Differential compaction

As the land surface subsides, alluvium stretches and eventually fails, generally in a region of abrupt change in alluvium thickness.

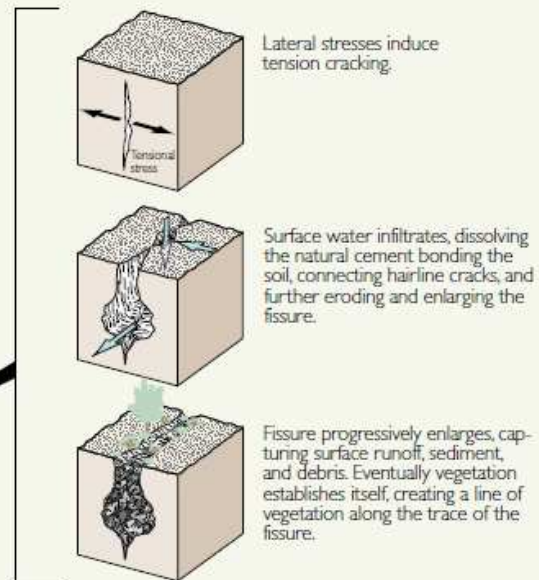


Fissures are concentrated in areas where the thickness of the alluvium changes, such as near the margin of basins or where bedrock is near the surface.



### OTHER POSSIBLE MECHANISMS

Horizontal seepage stresses and rotation of a rigid slab over an incompressible edge are other mechanisms that have been suggested. The observation that new fissures have formed between existing fissures and the mountain front argues against these two hypotheses. Hydrocompaction, or collapse of low-density soils upon complete wetting, and increased soil-moisture tension have also been suggested as possible mechanisms. Hydrocompaction in fact did occur during construction of sections of the CAP Aqueduct between the Picacho Mountains and Marana.



Other proposed mechanisms include piping erosion, soil rupture during earthquakes, renewed faulting, collapse of caverns or mines, oxidation of organic soils, and diapirism. Piping (subsurface soil erosion) along the trace of a fissure certainly plays a part in the opening, progressive enlargement and subsequent development of fissure gullies.

(Eaton and others, 1972; Carpenter, 1993)

Figura 2.1.14: Esquema de formación de grietas por subsidencia. Fuente: Eaton et al. (1972) y Carpenter (1993).

En la figura Figura 2.1.14 se observa el esquema de formación de las grietas de subsidencia, que suelen aparecer en los bordes del área afectada y paralelas las isolíneas de asiento, debido a los grandes esfuerzos de tracción que se producen en el terreno en esas zonas.

#### **2.1.4.5. La subsidencia en Murcia como ejemplo de subsidencia provocada por sobreexplotación de acuíferos en nuestro país**

Se presentan a continuación extractos de varios trabajos que se han centrado en el estudio de la subsidencia en las Vegas Media y Baja del Segura, y especialmente en la ciudad de Murcia.

##### **Geomorfología.**

La ciudad de Murcia se encuentra en la ribera del río Segura, caracterizado por sus grandes aportes de sedimentos, que han dado lugar a extensas áreas de rellenos aluviales con importantes espesores de depósitos de llanura de inundación, formados por gravas, arenas finas, limos y arcillas, que se han ido depositando, por decantación.

El esquema general de dicho relleno aluvial consiste en un primer tramo arcilloso o limoso por debajo del cual se encuentra un estrato más o menos continuo de gravas y gravillas. Todo ello caracterizado por frecuentes cambios laterales de facies y ocasionalmente con niveles o lentejones de naturaleza arenosa.

##### **Hidrología superficial y subterránea.**

Se trata de una de las zonas más áridas de la península ibérica, por lo que la red de drenaje natural la forman, además del río Segura, numerosos cauces temporales.

Por otra parte, el río Guadalentín, afluente del Segura, como consecuencia de una superficie de cuenca mucho menor, y la escasa pluviometría en cabecera, presenta directamente un carácter temporal en su cuenca baja, siendo actualmente un cauce seco salvo en las avenidas producidas en otoño y primavera, principalmente.

No obstante, al tratarse de una vega muy fértil, históricamente las obras de irrigación han modificado totalmente la hidrología y el paisaje de la cuenca, cuya llanura aluvial se ha visto completamente condicionada por la red de acequias y canales de riego.

En lo que se refiere a la hidrología subterránea, podemos destacar el sistema acuíferos de las Vegas Media y Baja del Segura, en el que “los acuíferos naturales aluviales de las vegas del Guadalentín y del Segura incluyen depósitos detríticos de alta porosidad, con una elevada transmisividad y que son explotables mediante pozos”. (Vázquez, 2001).

El acuífero del Segura, con una potencia superior a los 300 m, “está constituido por gravas, gravillas y arenas aluviales entre un nivel limo-arcilloso, sobre la primera capa, y niveles de margas limosas por debajo de éstas. Estas margas miocenas constituyen, también, los relieves laterales del sistema” (Vázquez, 2001).

Según los estudios realizados por el Instituto Geominero de España (IGME) desde 1972, se identifica el acuífero como la unidad hidrogeológica de las Vegas Media y Baja del Segura, extendiéndose la Vega Media entre Alcantarilla y el límite de las provincias de Alicante y Murcia y la Vega Baja desde este límite hasta el mar.

La superficie total abarcada es de 450 km<sup>2</sup>, de los que 150 km<sup>2</sup> corresponden a la Vega Media.

Por otra parte, en el relleno aluvial descrito anteriormente, se encuentran dos acuíferos diferenciados, un acuífero libre o superficial en la parte superior y un acuífero profundo o cautivo en la parte inferior, que según la zona puede ser único o multicapa, denominándose en este último caso acuífero profundo inferior o superior respectivamente.

En cuanto a la geometría del acuífero de la Vega Baja y Media del Segura, está constituido por una suave depresión topográfica de dirección ligeramente SW-NE, delimitada por los relieves más antiguos de edad Triásica a Neógeno. Es esta depresión la que se encuentra rellena por el conjunto aluvial plio-cuaternario (Figura 2.1.15).

“Las facies que constituyen el relleno de la cuenca se caracterizan fundamentalmente por su horizontalidad y la existencia de facies ricas en sedimentos clásticos, cuyo origen

se asocia a episodios de torrencialidad. El resultado es una gran heterogeneidad en la distribución lateral y vertical. Esta heterogeneidad se pone de manifiesto al analizar datos procedentes de sondeos, la mayor parte de las veces imposible de correlacionar entre sí, dada su diferente composición litológica" (Tomás, 2008).

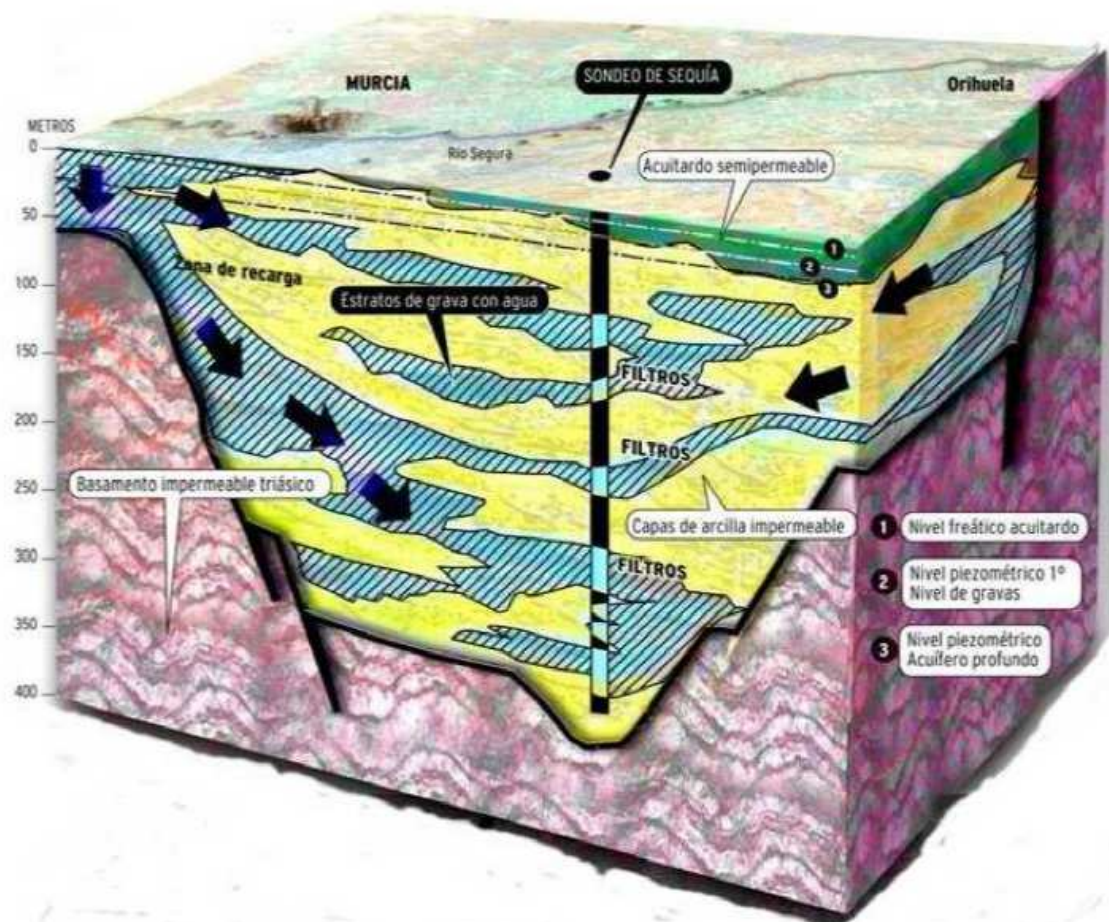


Figura 2.1.15: Bloque diagrama del acuífero de la Vega Baja y Media del Segura (CHS, 2007. Extraída de Tomás (2008).

El acuífero superficial formado por limos y arcillas de baja permeabilidad, presenta malas características hidrodinámicas y está muy condicionado por la red de drenaje superficial, dominada principalmente por el río Segura. Sin embargo, el acuífero profundo se compone de de gravas subyacentes muy permeables, con excelentes características hidrodinámicas (Geotecnia y Proyectos, 1995; Senent, 1995).



Las capas del acuífero presentan una distribución errática, generalmente interconectadas, aunque no siempre. De hecho, aguas arriba de Murcia, hay comunicación entre el acuífero libre superficial y el profundo, mientras que aguas abajo el acuífero profundo, que es monocapa o multicapa según las zonas, se caracteriza por ser un acuífero cautivo y semiartesiano.

En cuanto a la alimentación del acuífero en la Vega Media del Segura, podemos decir que se basa en las infiltraciones debidas a los excedentes de riegos, las pérdidas en la red de acequias y la pluviometría, como se indica en Figura 2.1.16 y Figura 2.1.17.

CONCEPTOS DE ALIMENTACIÓN	1972-82		1995	
	CAUDAL (hm <sup>3</sup> /año)	% TOTAL	CAUDAL (hm <sup>3</sup> /año)	% TOTAL
INFILTRACIONES DE LOS EXCEDENTES DE RIEGO	12	14	6	50
PLUVIOMETRÍA	63-88	86	6	50
<b>TOTAL</b>	<b>75-100</b>	<b>-</b>	<b>12</b>	<b>-</b>

Figura 2.1.16: Distribución de la alimentación del acuífero de la Vega Media del Segura. Extraída de: Vázquez (2011).

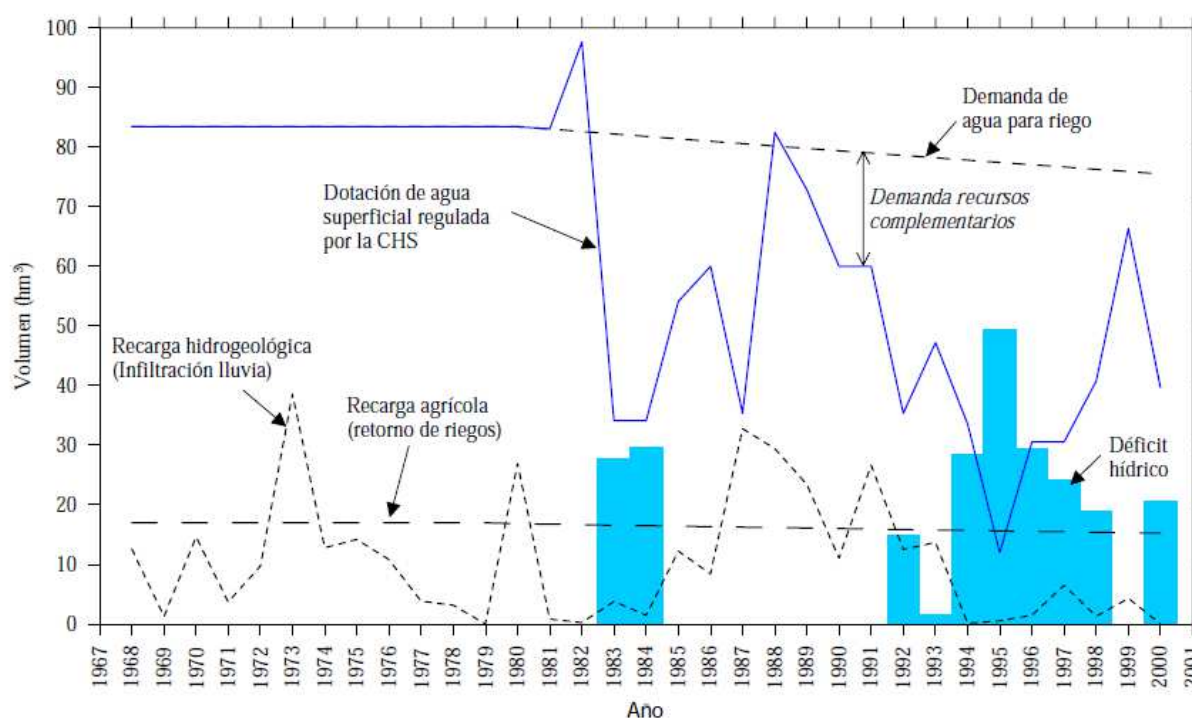


Figura 2.1.17: Balance hídrico de la cuenca el Medio Segura. Datos procedentes de Aragón et al. (2006).  
Extraída de Tomás (2008).

Otros factores que influyen en el descenso del nivel piezométrico del acuífero son:

- La desecación provocada por la sequía inherente al sureste peninsular.
- La evaporación del terreno.
- Los efectos de la urbanización, que conducen el agua al saneamiento, impidiendo la infiltración del agua en el terreno.

Además, se incrementan las extracciones de agua subterránea para compensar este déficit, con bombeos con fines agrícolas u otros usos en zonas urbanas (jardines, limpieza urbana, riego de particulares, industrias, etc).

Por lo tanto, podemos distinguir las siguientes causas principales de descenso del nivel freático en las inmediaciones de la ciudad de Murcia, que son:

- Pozos-sequia, que proliferaron en las épocas de sequía para sustituir el riego anteriormente existente mediante acequias. Estos pozos abundan en el perímetro de la ciudad de Murcia y por toda la Vega Media.
- Pozos de riego de parques y jardines, que se incrementaron para evitar el consumo de agua potable para este fin. Se trata de un número cercano a 60 distribuidos en la ciudad y pedanías.
- Otra fuente de extracción de agua del acuífero la constituyen los pozos realizados en ciertos edificios para mantener las bombas de calor de los circuitos de refrigeración-calefacción.
- También influyen las excavaciones de sótanos bajo nivel freático, las excavaciones profundas y los grandes árboles.
- Por último, no podemos olvidar la demanda de agua como consecuencia de la actividad turística, de forma que la escasez de agua no siempre está relacionada con la sequía hidrológica, sino que en ocasiones se ha debido a un aumento de la demanda por ampliación de superficie de regadío y/o el desarrollo turístico.

### **La explotación de los recursos hidrogeológicos.**

La disponibilidad de agua es uno de los factores principales que ha condicionado

históricamente el desarrollo de la península ibérica.

La explotación de los recursos hídricos subterráneos empezó en el siglo XVIII, experimentando una primera expansión en el XIX, como consecuencia del incremento de la producción agrícola para satisfacer una demanda creciente. Se constituyeron, por tanto, compañías dedicadas a la venta del agua, que se extraía mediante los pozos y las galerías horizontales llamadas "minas de agua". Se trataba de agua artesisana o bien elevada mediante norias movidas por molinos de viento.

A partir de esa época empezaron a descender los niveles piezométricos, provocando la desaparición de varios puntos de aprovechamiento. Además, a finales del siglo XIX comenzaron a utilizarse grupos de elevación con motores eléctricos, lo que supuso la extracción de caudales mayores desde cotas cada vez más profundas.

A principios del siglo XX se pone en práctica la intervención del Estado en la catalogación y la regulación del uso del agua subterránea en relación al desarrollo de las grandes infraestructuras hidráulicas. Sin embargo, continuaron proliferando los pozos de extracción de pequeña escala económica realizados por particulares, sin ningún tipo de control público.

La extracción sin control descrita en el apartado anterior propició la ampliación de la superficie de cultivo de regadío ganada al de secano, lo que supuso la rápida mejora económica de algunas comarcas que habían estado deprimidas hasta esa fecha. Al tiempo que también llevó a la sobreexplotación y a la degradación de las aguas.

En los años 50 comienza la modernización del sector a través de subvenciones e inversiones oficiales en las obras de infraestructuras y en la investigación de sus posibilidades, desde entonces se empieza a definir la cartografía hidrogeológica de la cuenca del Segura, obteniéndose datos sobre los balances de los acuíferos, así como de la piezometría y la calidad de las aguas.

Desde principios del siglo XXI se estiman los recursos hídricos subterráneos renovables

en la cuenca, en términos de caudal correspondiente a la fracción de escorrentía superficial total que en régimen natural correspondería a la recarga de los acuíferos, en unos 600 hm<sup>3</sup>/año. Por otra parte, en los 10000 pozos activos se da una sobreexplotación total por bombeo de 470 hm<sup>3</sup>/año. Las descargas totales en los manantiales se estiman en 440 hm<sup>3</sup>/año. El resultado del balance global de las aguas subterráneas se expresa en la Figura 2.1.18.

	CAUDAL (hm <sup>3</sup> /año)
SOBREEXPLOTACIÓN POR BOMBEO	470
DESCARGA DE MANANTIALES	440
<b>TOTAL AGUA EXTRAÍDA</b>	<b>910</b>
RECURSOS HÍDRICOS RENOVABLES	600
<b>SOBREEXPLOTACIÓN-DÉFICIT DE AGUA</b>	<b>310</b>

Figura 2.1.18: Balance global de las aguas subterráneas de la cuenca del Segura. Extraída de Vázquez (2011).

### La situación actual de la Cuenca.

Desde el último cuarto del siglo XX se han producido dos grandes sequías.

En la primera de ellas, en el período 1972-82, el acuífero de las Vegas Media y Baja del Segura recibía de 75 a 100 hm<sup>3</sup>/año procedentes de la infiltración de los excedentes de riego de las 40000 ha de superficie abarcada, la pérdidas en la red de acequias y canales, y la lluvia.

Se descargaba artificialmente mediante el bombeo de unos 2-5 hm<sup>3</sup>/año. El resto volvía a la superficie por el drenaje del río y la red de avenamiento, es decir, los azarbes. Pero las sequías de los años 1982 y 1993 cambiaron sustancialmente este balance.

En la segunda gran sequía, en el año 1995, la alimentación era de 12 hm<sup>3</sup>/año y las extracciones superaban los 29 hm<sup>3</sup>/año.



	1972-82	1995	DÉFICIT DE AGUA
ALIMENTACIÓN	75-100	12	76
EXTRACCIONES	2-5	29,6	26

Figura 2.1.19: Déficit de agua en la vega media del Segura  $\text{hm}^3/\text{año}$ , en los últimos periodos de sequía.  
Extraída de Vázquez (2011).

Por otra parte, los descensos piezométricos registrados en la ciudad de Murcia son los siguientes (C.O.I.C.C.P.; Mañá, 1995):

- 2,50 m para el trienio 1982-1984.
- 10,80 m para el cuatrienio 1992-1995.

### Estado general de los acuíferos.

Se trata de acuíferos de tamaño pequeño, en los que la reserva de las aguas subterráneas se puede agotar a corto y medio plazo, como consecuencia de la velocidad con la que manifiestan los descensos del nivel piezométrico.

En las situaciones de abundancia de agua, el exceso de riego respecto a las necesidades reales de los cultivos es de unos  $170 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Por lo que en estas condiciones, gran parte de los caudales de riego se vierten de nuevo al río, implicando, desde el punto de vista hidráulico, que se mantengan los niveles piezométricos excepcionalmente altos, aunque también se produce un efecto negativo de salinización de las aguas, puesto que el exceso de riego también conlleva el lavado de los suelos.

Además, la calidad del agua ha ido empeorando con el tiempo como consecuencia del vertido de aguas residuales deficientemente depuradas para su aplicación al regadío, el lixiviado de rocas y evaporitas en rocas y sedimentos y la aportación de fluidos hidrotermales.

Incluso han llegado a aparecer gases en los sondeos. Como consecuencia de estas circunstancias las aguas subterráneas resultan no ser aptas para el consumo humano

en la mayoría de los casos. Por otra parte, su aplicación para el riego implica la alcalinización y salinización del suelo, con datos que oscilan entre los 0,3 g/l de NaCl en Murcia y 0,8 g/l en la desembocadura del río, en Guardamar del Segura. Lo que provoca que, no resulten aptas para la mayoría de los cultivos.

En este sentido, el Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura, establece los siguientes criterios a efectos de la valoración del estado de las masas de agua subterránea y acuíferos, considerándose que están "en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo", y se le aplicarán las normas relativas a la gestión de este tipo de masas de agua para el otorgamiento de concesiones y autorizaciones, según el punto 4 del artículo 45 del Real Decreto 594/2014, de 11 de julio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura.

- a) Si el índice de explotación (la relación entre las extracciones reales y los recursos disponibles) es superior a 1.
- b) Si el índice de explotación es superior a 0,8 e inferior a 1 y no se ha podido comprobar que no existen descensos piezométricos.
- c) Si se ha podido comprobar la existencia de descensos piezométricos o reducciones significativas de caudales drenados por manantiales que no puedan atribuirse a condiciones de sequía o estiaje.
- d) Si se vienen realizando extracciones que generen un deterioro significativo de la calidad del agua.
- e) Si el régimen y concentración de las extracciones es tal que, aun no existiendo un balance global desequilibrado ni descensos piezométricos, se esté poniendo en peligro la sostenibilidad a largo plazo de los ecosistemas asociados o de los aprovechamientos.

En las inmediaciones del casco urbano de Murcia el flujo subterráneo de agua coincide con bastante aproximación con el flujo superficial del río Segura.

Por una parte, el canal del Reguerón se comporta como fuente de alimentación del acuífero, mientras que el casco urbano actúa como área de descarga del mismo, a través de los drenajes urbanos.

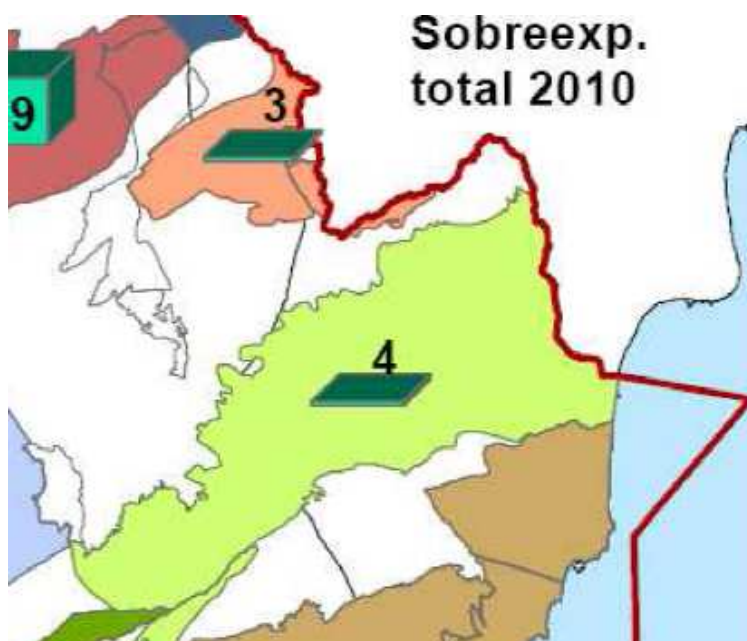


Figura 2.1.20: Vista parcial del mapa de la estimación de la sobreexplotación en % de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Segura. CHS (2015).

En líneas generales, en la actualidad resulta imposible atender a las demandas con los recursos de agua disponibles, puesto que además de las zonas infradotadas, existen amplios sectores con recursos sometidos a sobreexplotación y que serán agotados a corto y medio plazo, como lo indican los datos de la Confederación Hidrográfica del Segura de 2010 en su estimación de la sobreexplotación de los acuíferos de la demarcación, según la cual el acuífero de las Vegas Baja y Media del Segura se encontraba con un 3,5% de sobreexplotación (redondeado a 4 en Figura 2.1.20).

En los últimos tiempos se ha perseguido la reducción de la demanda mediante la disminución de la pérdidas en las redes de abastecimiento, la mejora en la eficiencia de los riegos y la aportación de recursos no convencionales, tales como la desalación de aguas salobres mediante ósmosis inversa y otras tecnologías, con lo que se ha conseguido minimizar el problema, sin llegar a resolverlo, para lo cual, las alternativas posibles serían la drástica disminución de demandas de riego y el trasvase de recursos externos procedentes de otras cuencas.

En este sentido, las directrices del Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura se condicionan a la posibilidades de transferencia que permita el cumplimiento de los objetivos de la planificación, de forma que en una masa de agua subterránea en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo, podrán otorgarse concesiones o autorizaciones para la modificación de características de aprovechamientos preexistentes que supongan una transferencia de recursos entre los distintos acuíferos que la conforman.

Esta modificación se encontrará condicionada en todos los casos a una reducción global permanente de los derechos al aprovechamiento de las aguas que se ostenten, no inferior al 20%.

Respecto a las extracciones por bombeo, la tendencia del Plan es la de mantenerlas estrictamente o disminuirlas. En muchos casos la pérdida de la calidad del agua ha hecho inservible su uso productivo o ha desaparecido la posibilidad del aprovechamiento por el secado del acuífero explotado. Se debe tener en cuenta que la disminución o anulación de las extracciones requeriría el cierre total o parcial de muchos de los pozos existentes, lo que implicaría afectar a la economía de la zona y llevaría a un enfrentamiento con agricultores, ganaderos y ciudadanos en general.

Durante la sequía de 1983 se puso en práctica el procedimiento de utilizar los acuíferos conectados al río para bombeos complementarios, que aumenten las garantías de suministro en situaciones de existencias de agua mínimas. Ante los buenos resultados obtenidos, esta acción se repitió en la sequía de los años 90. Las actuaciones de depuración de efluentes urbanos y procedentes de acuíferos degradados también se están potenciando para aumentar el volumen disponible de recursos.

Por otra parte el Plan Hidrológico de Cuenca prevé, como excepción al principio de recuperación de costes, que para que se alcancen los Objetivos Medioambientales en las masas de agua subterránea es necesaria la sustitución de bombeos no renovables por nuevos recursos externos con un coste unitario muy superior. La recuperación total de los costes de los nuevos recursos externos (que permitan la permuta de recursos

sobreexplotados) excedería la capacidad de pago del usuario y se pondría en riesgo la viabilidad del tejido productivo de la zona. Todo esto bajo la denominación de "Permuta de recursos sobreexplotados por nuevos recursos externos o desalinizados"

### **Registros de subsidencia y daños provocados.**

Los daños económicos provocados por el déficit de recursos hídricos se manifiestan de dos formas principales.

Por una parte las pérdidas económicas directas por la incidencia del déficit en las explotaciones agrarias y ganaderas, que suponen un porcentaje importante de la economía de la región.

Por otra parte los daños provocados por el descenso del terreno como consecuencia de la sobreexplotación de los acuíferos. Estos daños se manifiestan principalmente en forma de patologías en construcciones, que se presentan de forma continua, y alteraciones en la topografía del terreno con cambios en las cuencas de drenaje que modifican las zonas de inundabilidad, este último fenómeno se presenta de forma puntual, siendo el primero el que más afecta a la ciudad de Murcia.

### **Valores registrados de asientos del terreno.**

Los registros de subsidencia en Murcia muestran valores superiores a 10 cm, lo que ha originado problemas en edificios, urbanizaciones, instalaciones y obras públicas.

Jaramillo y Ballesteros (1997) estiman un asiento de entre 15 y 30 cm entre 1993 y 1997.

El asiento de la cota superficial del terreno comenzó a ser evidente a simple vista en diversos puntos de la ciudad a través de deformaciones de aceras y bordillos, grietas en pavimentos y asfalto, roturas de pretilas, vallas y subestructuras superficiales, movimientos diferenciales en peldaños exteriores, etc. según autores como Ballesteros.

En estas zonas se comprueba a simple vista un descenso del terreno de entre 5 y 10 cm (Ballesteros, 1995f).

### **Localización de los edificios con daños.**

La subsidencia ha afectado a más de 100 edificios en Murcia, distribuidos por toda la ciudad y con diferentes tipologías de cimentación y estructura.

Cabe destacar que algunos se encuentran próximos a parques y jardines que se riegan, como se ha comentado anteriormente, con agua extraída de pozos profundos municipales. Otros se encuentran junto a aparcamientos subterráneos de varias plantas, construidos recientemente, coincidiendo con los tiempos los que aparecieron los daños (Mañá, 1995). En ambos casos parece lógico considerar un descenso del nivel piezométrico local, como causa principal del descenso del terreno y por lo tanto de todas las patologías consiguientes.

Los valores de descenso del nivel freático coinciden en algún caso con el nivel inferior de la losa de cimentación del aparcamiento subterráneo. Estos edificios disponen de numerosas bombas de extracción de agua distribuidas en toda su superficie. Las excavaciones se realizaban en húmedo y la extracción del agua freática continuaba durante los años siguientes a su construcción. Se han dado casos en los que las empresas constructoras de los aparcamientos procedieron a las reparaciones de las lesiones aparecidas durante su ejecución en las construcciones colindantes (Ballesteros, 1994).

Se observa también la proliferación de anomalías en zonas con grandes extensiones de jardines, edificios en altura, estrato resistente de gravas a mayor profundidad de la media del casco y acusado descenso del nivel piezométrico, como el Polígono Infante Don Juan Manuel, donde se han apreciado hundimientos del terreno de hasta 8 cm (Ballesteros, 1996, a y b; Senent, 1995) en edificios situados preferentemente fuera del casco histórico, sobre todo en áreas de reciente transformación urbana.

Ballesteros (1995f) y Senent (1995) hacen mención prioritaria a las siguientes ubicaciones, aunque advierten de otros casos distribuidos irregularmente por la ciudad.

- a) Polígono Infante Don Juan Manuel, con una decena de casos.
- b) Vistabella, con cinco edificios cercanos al mercado de abastos.
- c) C/ Cartagena, con media docena de casos y basculamientos en coronación de hasta 30 cm.
- d) Gran Vía Alfonso X el Sabio y Plaza Circular, con cinco o seis casos.
- e) Alrededores del Hospital Provincial.
- f) Polígono de la Fama, zona de viviendas sociales y Plaza Santoña.
- g) Ronda Norte, en las proximidades del nudo de la autovía.
- h) Entorno del Jardín de Floridablanca.
- i) Barrio de Vista Alegre.

El descenso del nivel piezométrico se hizo evidente bajo muchos de los inmuebles a través de la información suministrada por estudios geotécnicos y porque, en bastantes casos, las excavaciones de los sótanos habían exigido la extracción del agua freática, siempre próxima a la cota de cimentación, y en la fecha de detección de los deterioros los pozos de drenaje se encontraban secos (Jaramillo, 1997).

Hay edificios en los que, a fecha de 31 de enero de 1997, se habían realizado actuaciones de recalce parciales o totales y, en cierto sentido, los más afectados, se encuentran situados en el barrio de Vistabella, cerca del Hospital General Universitario, en el entorno de la Plaza Circular en la Gran Vía, en la calle de Alfonso X el Sabio, en el Polígono Infante Don Juan Manuel, en las proximidades de los Jardines del Malecón y en el Polígono de la Fama junto a la Plaza Juan XXIII.

De toda la información citada, y en función de la distribución comprobada se puede establecer que las zonas del casco urbano de Murcia con una mayor profusión de casos de edificios con daños provocados por la subsidencia del terreno causada por el descenso generalizado de los niveles piezométricos son:



- a) Polígono Infante Don Juan Manuel.
- b) Barrio de El Carmen, cercanías del Cuartel de Artillería y alrededores de los Jardines de Floridablanca.
- c) Entorno de los Jardines del Malecón.
- d) Barrio de Vistabella, proximidades de la Condomina y zona del casco entre la Plaza de Toros y la Catedral.
- e) Polígono de la Fama, cerca de la Plaza Juan XXIII.
- f) Alrededores de la Plaza Circular, Jardines de la Fama, Gran Vía Alfonso X el Sabio y barrio de Vista Alegre.
- g) Barrio de Santa María de Gracia, entre la Ronda Norte, el Auditorio Municipal y el Pabellón de Deportes Príncipe de Asturias.

### Daños generales.

En el año 1991 algunos propietarios comienzan a detectar en el interior de sus viviendas algunas patologías, la mayoría de carácter leve (Ballesteros, 1994). A partir de los años 1993-94 las lesiones se hacen muy numerosas e importantes, progresando con gran rapidez.

De esta manera, se pudo establecer una correlación entre los descensos del nivel piezométrico y el número de reclamaciones por daños en edificios, como se muestra en la Figura 2.1.21.

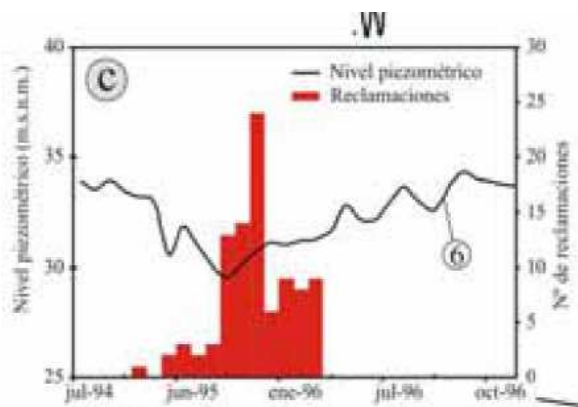


Figura 2.1.21: Correlación entre descenso de nivel piezométrico y reclamaciones por daños. Extraída de Tomás (2008).

En tabiques y cerramientos han surgido fisuras y grietas de hasta 10 mm de espesor. En las fachadas se observan grietas y fisuras con inclinaciones de 45°, de forma escalonada, siguiendo el mortero de unión de las piezas de ladrillo. En algunos lugares se disponen formando arcos de descarga. En varios puntos de unión entre soporte y cerramiento también se han observado fisuraciones. Los huecos de carpintería aparecen con descuadres que dificultan o impiden su maniobra. En cocinas y baños se han producido desprendimientos y abombamientos de alicatados y azulejos. En techos y solados también se han puesto de manifiesto fisuras de mayor o menor importancia.

En ocasiones se han separado los tabiques de los techos. Se han roto celosías y otros elementos de plementería (Ballesteros, 1995d). Han surgido humedades en medianerías y proximidades de las juntas de dilatación, con arrancamientos de las telas asfálticas de sellado (Ballesteros, 1995e).

Se han observado desplomes, giros y asientos diferenciales, que han dado lugar a aplastamientos de enlucidos, empujes laterales, roturas de pretilos y fisuras horizontales en paños de medianeras.

Los asientos estimados en algunos casos alcanzan valores de 4-5 cm y los desplazamientos horizontales en cabeza del edificio provocados por los basculamientos, 8-20 cm (Ballesteros, 1995e) Se han originado fisuras en forjados, en muros de contención y de sótanos (Ballesteros, 1995c, 1996b).

Se debe tener en cuenta que la acción del terreno sobre las cimentaciones también puso en evidencia muchos vicios ocultos en las construcciones, que dieron lugar a la aparición de nuevos daños y que no habían dado la cara hasta entonces. Juntas de dilatación no respetadas, fábricas mal realizadas, forjados demasiado flexibles permitidos por las anteriores instrucciones de las estructuras de hormigón armado, especialmente en cuanto a limitaciones de flecha que dieron lugar a fisuraciones de tabiquerías a partir de determinadas luces, pilotajes mal ejecutados en los años 70, son algunos ejemplos de factores que, sumados a la subsidencia general del terreno, han provocado patologías de cierta repercusión.

En ocasiones han aparecido las fisuras por la excesiva flexibilidad de los forjados con la sobrecarga de algunos recuadros de los pórticos debido a los asientos. Las estructuras ejecutadas en los años 1970-80 se realizaron con una normativa vigente mucho más permisiva que la actual en cuanto a la relación canto-luz y a las flechas toleradas en los forjados. Muchas de ellas tienen un canto de 23 cm y luces de hasta 7 m (Ballesteros, 1995e). La experiencia acumulada después ha puesto de manifiesto la incompatibilidad de estos valores admisibles con los modos de construcción de tabiquerías y cerramientos, cuya rigidez no admite tales deformaciones sin romperse.. En cualquier caso, la normativa también exigía que las flechas fueran compatibles con el sistema de cerramientos.

Otras veces la potencialidad de la aparición de patologías se debe al criterio de diseño con el que se realizó la estructura. Si las luces adyacentes son muy desiguales y la relación entre el canto del forjado y la luz entre vanos es escasa, las deformaciones pueden alcanzar valores considerables. Hay ejemplos de luces contiguas de 3,5 y 7 m y canto de forjado de 23 cm (Ballesteros, 1995d). Si las deformaciones se van acumulando desde las plantas altas hasta las bajas por la transmisión de cargas a través de la tabiquería interior, la fisuración irá creciendo hacia las plantas inferiores. Por lo tanto, aunque el diseño estructural de estas construcciones podía ser el habitual cuando fueron realizadas, es propenso a la aparición de patologías.

Por otra parte, los daños existentes en muchas de las edificaciones se vieron agravados y resaltados por los descensos del terreno. Hay deformaciones y fisuraciones, causadas por una excesiva flexibilidad de los forjados, que aparecieron con escasa entidad al poco tiempo de terminada la edificación y que fueron aumentando paulatinamente hasta alcanzar valores definitivos.

Muchos de estos movimientos se encontraban estabilizados o tenían alteraciones periódicas por las diferencias higrotérmicas diarias y estacionales. Pero a la lenta evolución de estas viejas lesiones se le han superpuesto los nuevos asientos de cimentación, cuya progresión suele ser mucho más rápida y cuyos efectos se suman a los anteriores.

Resulta especialmente descriptivo, en este sentido, el trabajo del Dr. Roberto Tomás en la presentación de su tesis doctoral.



Figura 2.1.22: Deformación y agrietamiento de aceras de la ciudad de Murcia. Fotografía superior izquierda extraída de Mulas (2007), el resto de Tomás (2008).

“En el caso concreto del casco urbano de Murcia la consolidación del suelo en profundidad se manifiesta de forma directa en superficie, siendo observable a simple

vista a modo de aceras irregulares, separación de peldaños, firmes agrietados, rotura de muros de fábrica, apertura de medianeras de edificios, etc". Tomás (2008), como se observar en Figura 2.1.22 y Figura 2.1.23.

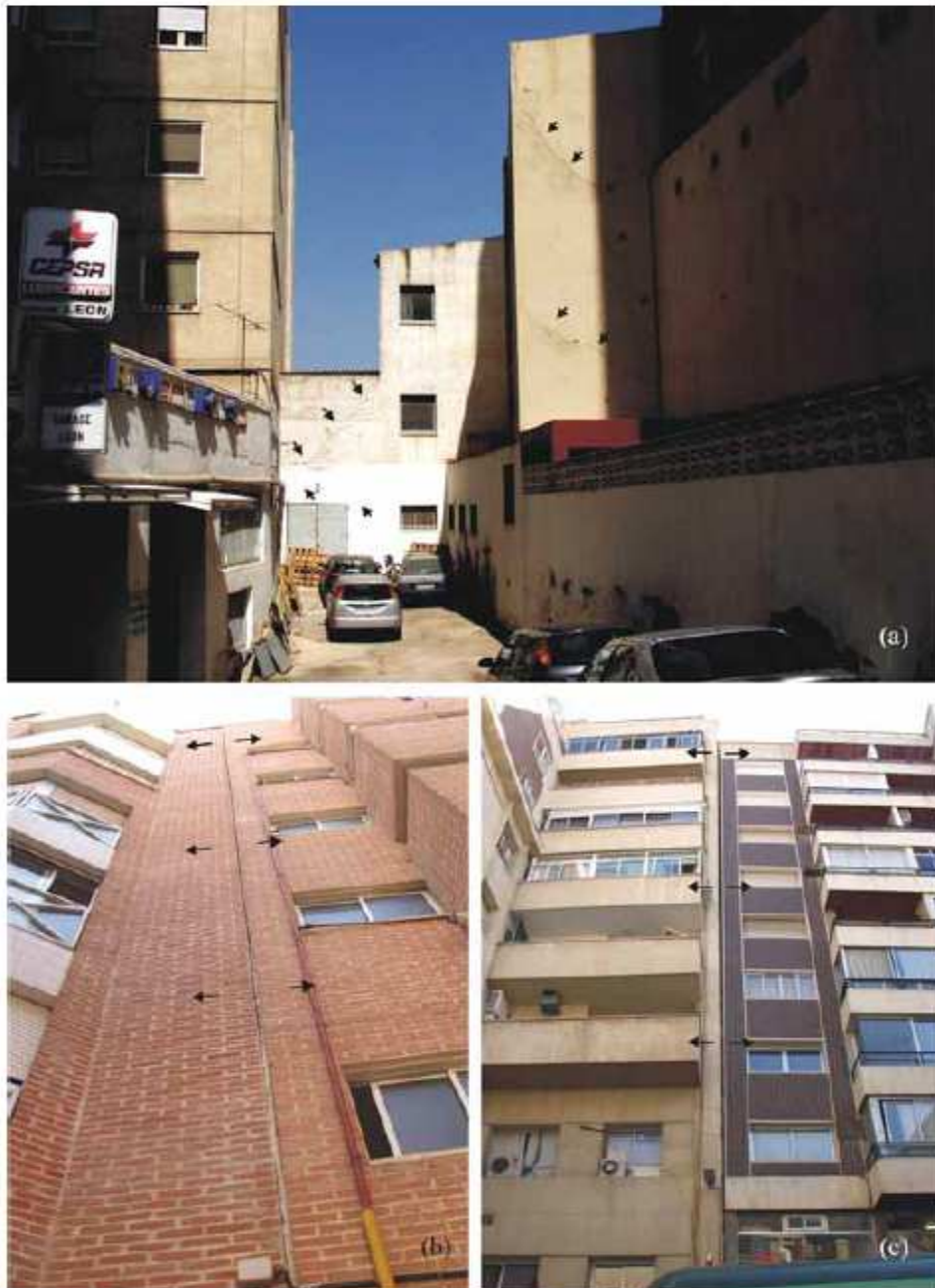


Figura 2.1.23: Agrietamiento de paramentos y apertura de juntas de medianera entre edificios por asiento diferencial de los mismos. Patologías en edificios en la ciudad de Murcia. (a) Grietas a 45°, (b) y (c) separación entre edificios colindantes. Extraída de Tomás (2008).

"Con todo, las patologías más importantes se han observado en edificios, en ocasiones de gran altura, que se han visto obligados en numerosas ocasiones a ser recalzados para conservar su estabilidad". Tomás (2008).

### **2.1.5. Subsidencia originada por movimientos tectónicos**

Los movimientos tectónicos son otra de las causas de subsidencia y también otro de los fenómenos destacados que se dan en el Valle del Guadalentín, por lo que resulta interesante el conocimiento de algunos aspectos de la tectónica de placas y su influencia en los procesos de subsidencia.

Según la Teoría de Placas propuesta por Alfred Wagener, la corteza terrestre y el manto superior (litosfera) están formados por una serie de placas (la mayoría de las placas contiene litosfera continental y oceánica) que continuamente cambian su posición relativa, unas respecto a otras, lo cual daría explicación a la existencia de los siguientes fenómenos: orogénesis, terremotos y volcanes así como la deriva continental.

A continuación se exponen las leyes de la tectónica de placas.

- 1) La superficie de la tierra esta dividida en placas rígidas (segmentos esféricos del orden de los 100 Km de espesor) que forman la litosfera (placas litosféricas).
- 2) Las placas se crean en las dorsales oceánicas (uniones constructivas), zonas de acreción.
- 3) Las placas se mueven sin deformación sobre un medio viscoso: zona de baja velocidad.
- 4) Las placas se destruyen en las zonas de subducción.
- 5) La parte continental de una placa no es sumergible.
- 6) Los límites de placas se definen sismológicamente.
- 7) La energía interna de la tierra es disipada en los márgenes de placa por medio de terremotos (mecánicamente) y volcanismo (térmicamente).
- 8) Los movimientos de las placas rígidas son gobernados por leyes matemáticas que

rigen los movimientos en una esfera. El movimiento entre dos placas puede ser definido por un polo de rotación (polo de Euler) y por la velocidad angular relativa .

Existen varios tipos de placas tectónicas, principales, secundarias, microplacas, y otras placas, y la interacción o movimiento relativo entre ellas puede ser de tres tipos en los bordes o límites de placa: divergentes (dorsales oceánicas), en las que se genera nueva litosfera oceánica, convergentes de subducción (fosas), en los que se destruye litosfera, y fallas o límites transformantes (en los que no se crea ni se destruye litosfera, sino que se desplaza lateralmente una placa con respecto a otra).

Los desplazamientos de las placas litosféricas son causados por la energía térmica en el interior terrestre ayudada por la energía potencial gravitatoria.

La litosfera oceánica se renueva continuamente, mientras que la litosfera continental tiene un carácter más permanente.

Se definen a continuación algunos conceptos:

Dorsales y fondos oceánicos: el océano Atlántico está recorrido de norte a sur por un relieve submarino que se eleva sobre las llanuras circundantes y que emerge en Islandia: es la dorsal oceánica. Dicha dorsal se bifurca hacia el océano Índico y el Pacífico. La dorsal atlántica tiene un surco central, limitado a ambos lados por fallas normales, que se denomina rifts.

Distribución y edades de los sedimentos: se asume que no se distribuyen homogéneamente. No hay sedimentos en las dorsales. Los más superficiales son actuales y su antigüedad aumenta con la profundidad. La edad de los más antiguos de cada zona es similar a la de los basaltos situados debajo de ellos. En las dorsales, las rocas son actuales y su antigüedad se incrementa al distanciarnos de ellas.

Bandeado magnético: el proceso ocurre durante el enfriamiento del magma y una vez que se ha completado, el sentido de la imantación de los minerales es permanente e



indicará la orientación que tenía el campo magnético cuando se formó la roca. Esto permite utilizarlos como brújulas fósiles. El magnetismo impreso en las rocas recibe el nombre de paleomagnetismo. Su estudio ha permitido saber que el campo magnético terrestre se ha invertido muchas veces, intercambiándose las posiciones del polo norte y el polo sur magnético.

Subsidencia térmica: la litosfera se enfría al alejarse de la dorsal, y se hace más gruesa y más densa, causando su hundimiento. Este hundimiento del fondo oceánico se denomina subsidencia térmica. Se explica porque, en la dorsal, la corteza es fina y debajo de ella pueden alcanzarse temperaturas muy altas. El contacto con el agua del océano enfría con rapidez la corteza recién formada, por lo que se reduce su volumen. En los tramos próximos a la dorsal, la litosfera está constituida solo por corteza oceánica, pero a medida que envejece, se enfría y la capa más superficial del manto se adosa a la base de la corteza.

Zonas de subducción: se denomina subducción al proceso por el que la litosfera se introduce en el interior terrestre. Las zonas de subducción se sitúan en los límites de dos placas litosféricas que presentan un movimiento convergente, por lo que también reciben el nombre de márgenes convergentes. Como consecuencia de la subducción se destruye litosfera oceánica, y se hace a un ritmo tal que equilibra, a escala planetaria, la cantidad de litosfera generada en las dorsales. Se diferencian 3 casos de convergencia:

Convergencia continental-oceánica: la litosfera continental es más ligera y gruesa que la oceánica. Por esta razón, si converge una placa continental con otra oceánica, es esta última la que se introduce bajo la continental. La litosfera oceánica transporta sedimentos en su parte superior, y la mayor parte de ellos no subducen. Estos sedimentos son apilados y deformados, originando lo que se denomina prisma de acreción. Entre el prisma de acreción y los sedimentos que todavía no han sido apilados se forma un surco alargado, la fosa oceánica. En ocasiones hay fragmentos de litosfera oceánica que no subducen sino cabalgan sobre el continente y se adosan a él (es el proceso denominado obducción) el caso más frecuente de obducción ocurre al colisionar con el continente islas volcánicas. El desplazamiento de una placa con

respecto a la otra no es continuo sino que se produce a saltos, como consecuencia de los cuales se generan terremotos. Las zonas de subducción presentan la mayor actividad sísmica del planeta. Los terremotos, atendiendo a la profundidad del foco sísmico, se clasifican en los siguientes tipos: someros, intermedios y profundos. La litosfera oceánica que subduce está fría y contiene ciertas cantidades de agua. El rozamiento con la litosfera continental incrementa la temperatura, y el agua baja el punto de fusión de los minerales. Esto permite que se produzca una fusión parcial de los minerales más ricos en sílice, que funden a menor temperatura. Se originan así magmas que alimentarán erupciones volcánicas que pueden formar cordilleras como los Andes.

Convergencia oceánica-oceánica: se caracteriza porque la litosfera subduce con un ángulo de inclinación, el acoplamiento entre las dos placas es débil lo que favorece la subducción de los sedimentos oceánicos, como consecuencia de lo anterior no se forma prisma de acreción, presenta fosas muy profundas, y el magmatismo asociado origina un arco de islas, como las Islas Marianas.

Convergencia continental-continental: si la placa que subduce tiene un tramo oceánico y otro continental tras él, una vez que se ha introducido toda su litosfera oceánica se produce el encuentro de los continentes. Dado que la litosfera continental es lo suficientemente ligera como para no subducir, se habla de colisión. Tras la colisión continental se produce el cabalgamiento de un continente sobre el otro. Este tipo de convergencia es el que ha originado cordilleras como el Himalaya y los Alpes.

El movimiento de las placas tectónicas puede generar fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una con respecto a la otra, provocando esfuerzos en el material o roca que la constituye hasta romperla. Esta ruptura (fallamiento) es súbita y ocurre a lo largo de planos llamados planos de falla o, simplemente, fallas. Generalmente, la ruptura comienza en un punto y de allí se propaga, esto es, se extiende a puntos cercanos y de allí a otros hasta romper todo el plano de falla; este proceso se lleva a cabo en cuestión de fracciones de segundo en el caso de sismos pequeños y puede durar minutos cuando se trata de sismos grandes.

De esta manera, se define como falla a un plano de discontinuidad de una masa rocosa o material poco consolidado en donde se observa, un movimiento relativo entre los bloques resultantes. Dependiendo de su movimiento, las fallas son pasivas o activas; las primeras prácticamente no constituyen un peligro debido a que ya no presentan desplazamiento (Sedesol-Coremi, 2004a). Sin embargo, las fallas activas pueden tener movimientos imperceptibles a largo plazo, incluso de varios de varios siglos, o bien pueden presentarse de forma súbita.

Las fallas activas pueden romper aceras, tuberías, viviendas, surcos de cultivo, entre otros elementos, o bien, pueden desencadenar sismos, deslizamientos o derrumbes en las áreas inmediatas a la falla (Sedesol-Coremi, 2004a), por lo que el peligro potencial aparece cuando se presenta un asentamiento humano sobre una falla activa o en las inmediaciones de ésta.

Las deformaciones que originan las tensiones de la tectónica de placas sobre la litosfera se pueden clasificar según la naturaleza de la deformación en función de que ésta sea plástica, dando lugar a pliegues, o rígida con la formación de fallas.

Veamos a continuación algunas definiciones del concepto de falla desde el punto de vista geológico:

"En geología, una falla es una fractura o zona de fracturas a lo largo de la cual ha ocurrido un desplazamiento relativo de los bloques paralelos a la fractura" (Bates y Jackson, 1980).

"Las fallas son discontinuidades singulares que corresponden a planos de rotura o fracturación con desplazamiento relativo entre los bloques. La extensión de las fallas puede variar entre algunos metros y centenares de kilómetros. Pueden llevar asociadas zonas de debilidad denominadas «zonas de falla» o brechas, en las que en ocasiones no se puede distinguir un plano neto de rotura" (González Vallejo et al., 2002).

Las fallas se pueden generar esencialmente, debido a la fractura de grandes bloques

de rocas en la corteza terrestre cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas. El movimiento causante de esa dislocación puede tener diversas direcciones: vertical, horizontal o una combinación de ambas. El desplazamiento de las masas montañosas que se han elevado como consecuencia del movimiento provocado por fallas, puede ser de miles de metros como resultado de los procesos devenidos durante largos períodos de tiempo. La zona de ruptura tiene una superficie generalmente bien definida denominada plano de falla y su formación va acompañada de un deslizamiento tangencial de las rocas respecto a ese plano.

Según Tomás et al. (2009) "Los descensos de la superficie terrestre producidos por las fallas producen un efecto conocido como subsidencia tectónica (Figura 2.1.24). Este tipo de subsidencia es, en general, muy lenta y de pequeña magnitud (de pocos mm o décimas de mm al año) frente a otros tipos de subsidencia.

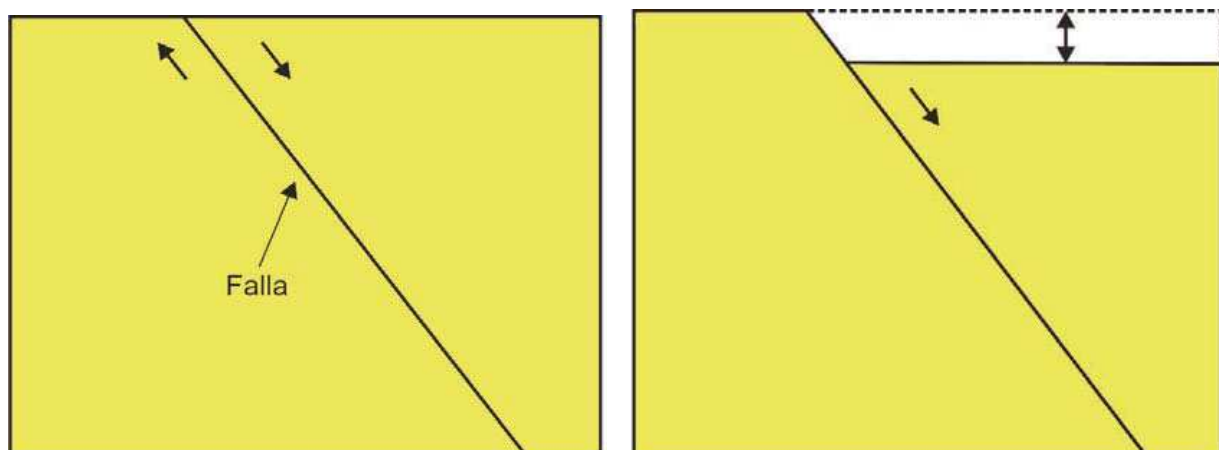


Figura 2.1.24: Esquema de funcionamiento de la subsidencia tectónica. Extraída de Tomás et al. (2009).

Otra explicación, que en este caso vincula la subsidencia con la actividad sísmica es la que mantiene que la actividad sísmica produce levantamientos y hundimientos en el terreno según el ciclo representado en la Figura 2.1.25.

El diagrama de la figura muestra las deformaciones asociadas a la subducción, ligadas a la actividad sísmica.

Entre sismos (a) la deformación elástica se acumula si la falla inversa se bloquea, dando lugar a un levantamiento del terreno.

Durante un sismo importante el borde principal de la placa se levanta y el domo sufre subsidencia por colapso.

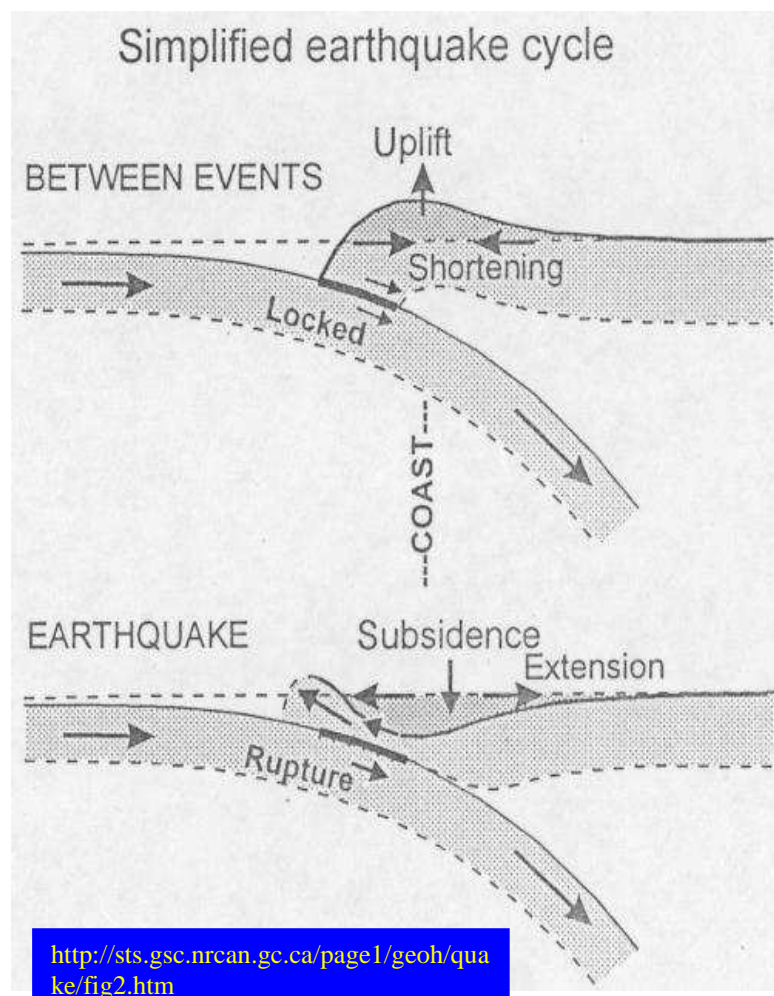
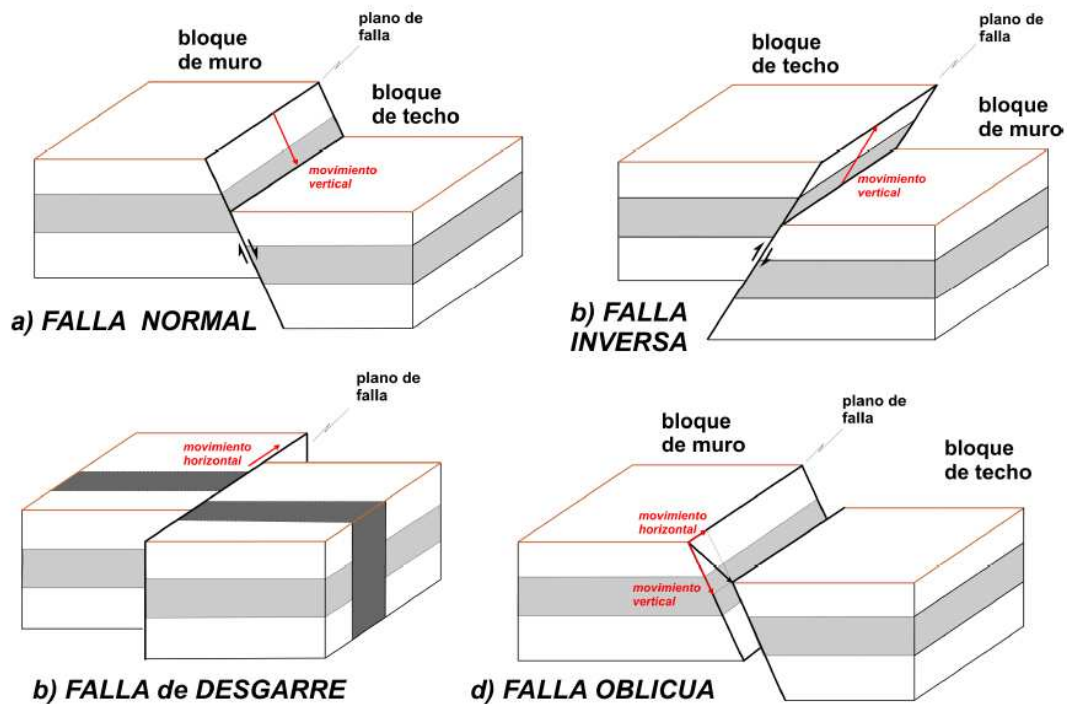


Figura 2.1.25: Esquema de subsidencia asociada a actividad sísmica. Extraída de Rojas Carrizales.

A continuación se presentan los principales tipos de fallas según el movimiento relativo de los bloques (Figura 2.1.26).



Tipos principales de fallas: con *movimiento en la vertical* de los bloques: a) *falla normal* y b) *falla inversa*. Con *movimiento en la horizontal* de los bloques: c) *falla de desgarre*, en este caso no tiene sentido establecer cual es el bloque de muro y de techo. Con *movimiento mixto en la horizontal y en la vertical*: d) ejemplo de *falla oblicua*, con movimiento en la horizontal y en la vertical.

Figura 2.1.26: Tipos de fallas. Extraída de Giner-Robles et al.

## 2.2. Técnicas de radar interferométrico de apertura sintética (InSAR) en el estudio de la subsidencia

Mediante la técnica de interferometría radar diferencial se determinan los pequeños retrasos o adelantos que se producen en las ondas radar emitidas y recibidas desde un satélite en dos instantes diferentes. A través de estos retrasos diferenciales, entre cada par de imágenes comparadas, se produce un patrón de interferencia que es proporcional al cambio de la distancia entre la posición del satélite y el terreno, con lo que se pueden determinar cambios topográficos con una resolución milimétrica así

como su evolución con el tiempo.

Los fundamentos de la interferometría radar (InSAR) se basan en la comparación, píxel a píxel, de los valores de dos imágenes complejas SAR diferentes. De forma general, la fase es el punto de oscilación de la onda armónica electromagnética debida a la radiación de la antena SAR y en relación al tiempo doble de viaje, en este caso el recorrido antena-terreno-antena. Normalmente, es conveniente, por simplicidad, representar una onda como una función compleja.. Dicho número complejo, en coordenadas polares, corresponde con el argumento un módulo (amplitud).

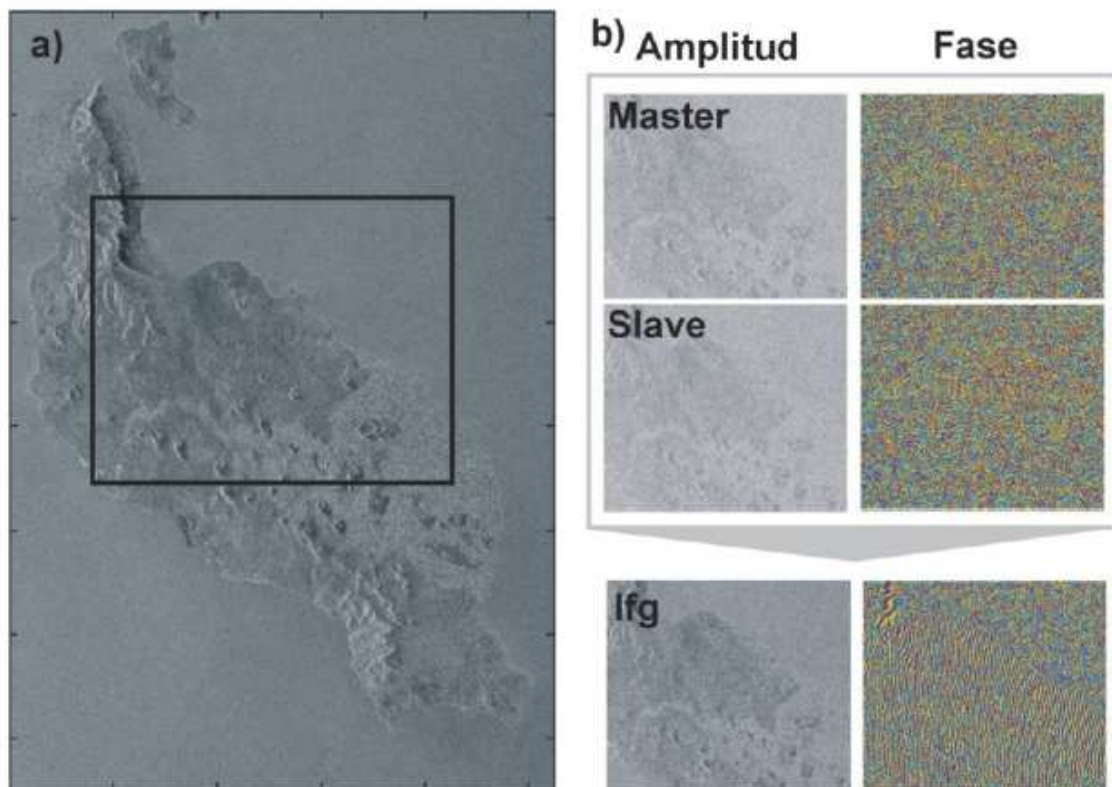


Figura 2.2.1: a) Imagen de amplitud. La intensidad del brillo indica la cantidad de energía reflejada, esta dependerá de la rugosidad, pendiente y propiedades eléctricas de la superficie. b) Ilustración de la formación de un interferograma radar, Ifg (producto de las imágenes Master y Slave). Extraída de González (2010).

Un interferograma no es más que la diferencia de fases entre las dos imágenes, que se calcula como la multiplicación de la imagen compleja de referencia (master), por la conjugada compleja de la esclava (slave), Figura 2.2.1.



Al generar un interferograma por medio de la diferenciación de fases entre ambas imágenes, la resultante, denominada fase interferométrica (Figura 2.2.1, b, ifg), no dependerá de las características de reflexión del terreno, que suponemos constantes en el tiempo. De este modo, la fase interferométrica sólo dependerá de la diferencia de distancias recorridas en las dos imágenes (Figura 2.2.2).

La diferencia de fases es una suma compleja, de varias contribuciones. Dichas contribuciones se deben a las diferencias geométricas de las dos adquisiciones, a la topografía, a la deformación del terreno y a las condiciones de la atmósfera en el momento de adquisición de las dos imágenes.

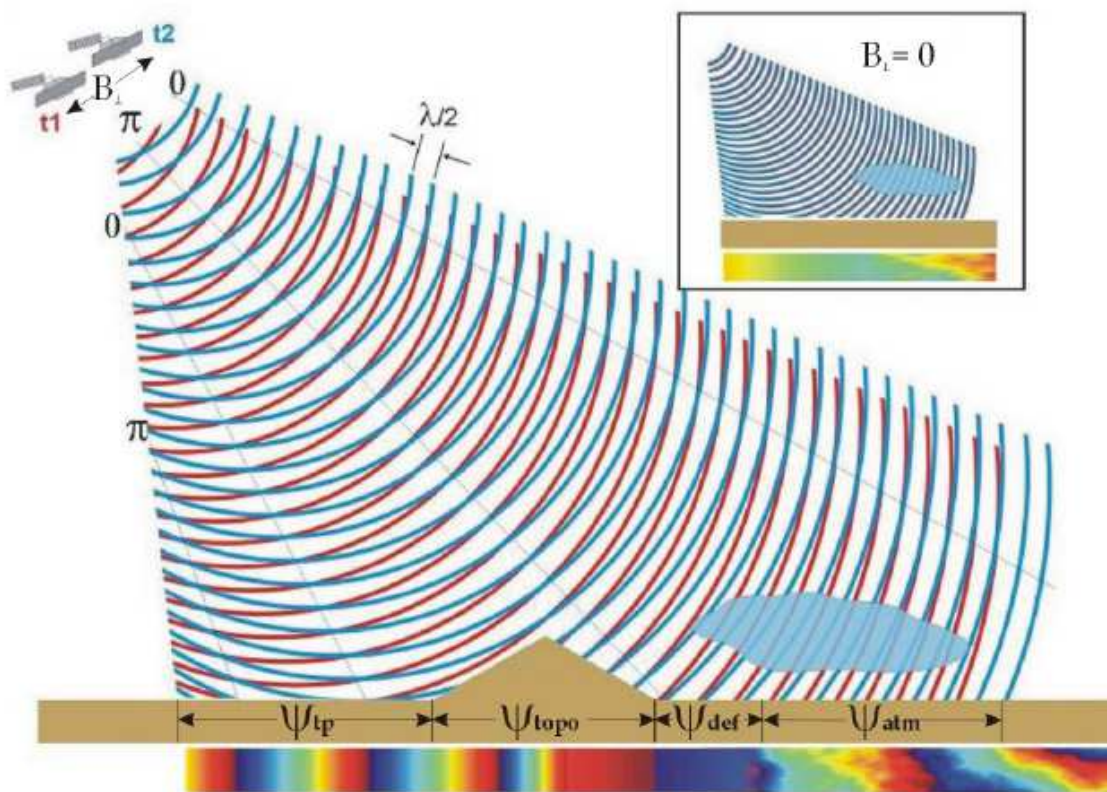


Figura 2.2.2: Contribuciones principales a la fase de un interferograma, donde  $t_1$  y  $t_2$  corresponden con las geometrías durante la adquisición de la imagen master y slave respectivamente.  $B_{\perp}$  corresponde con la línea de base perpendicular. En el caso de que  $B_{\perp} = 0$  las contribuciones debidas a la tierra plana (tp) y topografía (topo) se eliminan, quedando sólo las contribuciones por deformación del terreno (def) y atmosférica (atm). Por simplicidad este gráfico la fase de deformación es igual a cero. Extraída de González (2010)

### **2.3. Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) en el estudio de la subsidencia**

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) consisten en unas constelaciones de satélites que se usan para transmitir rangos de señales que sirven para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, independientemente de que se trate tierra, mar o aire.

El sistema permite determinar las coordenadas geográficas y la altitud de un punto dado como resultado de la recepción de señales provenientes de la mencionadas constelaciones de satélites artificiales de la Tierra, y los principales fines son la navegación, el transporte, la localización geodésica, así como tratamiento de datos hidrográficos, agrícolas, etc.

Los sistemas de navegación basados en satélites artificiales proporcionan información sobre la posición, en un determinado instante (cuatro dimensiones) con una gran exactitud, en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día, e independientemente de las condiciones climatológicas.

El posicionamiento el GPS se basa en un principio bastante simple basado en la intersección de 3 vectores. Estos "vectores" corresponden a las distancias desde un punto cualquiera del que se quieran obtener coordenadas hasta 3 satélites de los cuales se conocen sus posiciones. Por lo tanto, el punto estará localizado en la intersección de las tres esferas de radio conocido (distancias). En la práctica, la única forma de determinar esas distancias, es la estimación del tiempo de viaje de una señal desde un satélite hasta el punto receptor, lo que implica que necesitaremos un cuarto satélite, para determinar si existe un retraso entre el tiempo del satélite y el del receptor. Estas distancias se estiman utilizando las señales que emiten los satélites GPS

Se denominan observables GPS a la pseudodistancia y a la diferencia de fase.

Los receptores GPS determinan la distancia (o pseudodistancia) entre el satélite y la

antena receptora por medio de la diferencia en tiempo que tarda la señal en viajar del satélite al receptor. La pseudodistancia es por tanto la diferencia de tiempos multiplicada por la velocidad de la luz.. Esta determinación no resulta muy precisa y está influida por la ausencia de sincronización entre los relojes del satélite y del receptor, y también por los retardos atmosféricos (ionosférico y troposférico), etc.

La diferencia de fase portadora es un observable más preciso que la pseudodistancia y es el que se utiliza realmente para las aplicaciones de alta precisión en estudios geodinámicos.

Es la fase de la onda portadora registrada con respecto a la fase generada por el reloj del receptor GPS. La diferencia de fases se denomina observable de fase (en inglés, carrier beat phase). Sin embargo esta medida de fase es ambigua, puesto que los receptores GPS no pueden distinguir un ciclo de onda portadora de cualquier otro ciclo. El receptor solamente mide la fase y sus cambios con el tiempo, por lo tanto la fase inicial es indeterminada (ambigua) en un número entero de ciclos ( $k$ ).

Combinaciones lineales de observables GPS.

Los observables GPS están afectados por errores que perturban y añaden aleatoriedad a las medidas en diferente grado (ruido). Teniendo en cuenta el origen, magnitud y correlación de estos errores, se han desarrollado diferentes combinaciones observacionales que tienden a eliminarlos o reducirlos. Así, podemos formar combinaciones o diferencias de observables entre receptores o entre satélites (Figura 2.3.1), para obtener un nuevo observable que reduzca algún tipo de error o facilite algún cálculo (resolución de ambigüedades, por ejemplo). Sin entrar en detalle, algunos ejemplos son los siguientes, según se trate de diferencias simples o dobles diferencias:

### **Diferencias simples:**

- Diferencias entre las señales recibidas por dos receptores diferentes que observan y registran simultáneamente las señales de un sólo satélite.

- Diferencias entre dos satélites que son observados y registrados por un sólo receptor, lo que elimina los errores derivados del desfase en tiempo del reloj del receptor, y por tanto el observable diferencias simples de diferencia de fase toma la forma (idem para las pseudodistancias).
- Dentro de las diferencias simples se pueden realizar también diferencias entre diferentes épocas, y por tanto el observable diferencias simples de diferencia de fase entre dos épocas ( $t_i$  y  $t_j$ ).

### Dobles diferencias:

- Los observables también se pueden restar (diferenciar) entre pares de receptores o entre pares de satélites, para eliminar los errores derivados del desfase en tiempo de los relojes del receptor y del satélite al mismo tiempo.

También, se pueden formar triples diferencias que eliminan la ambigüedad de fase inicial, pero este tipo de combinación no es tan preciso como las dobles diferencias (Hofmann-Wellenhopf y otros, 2001).

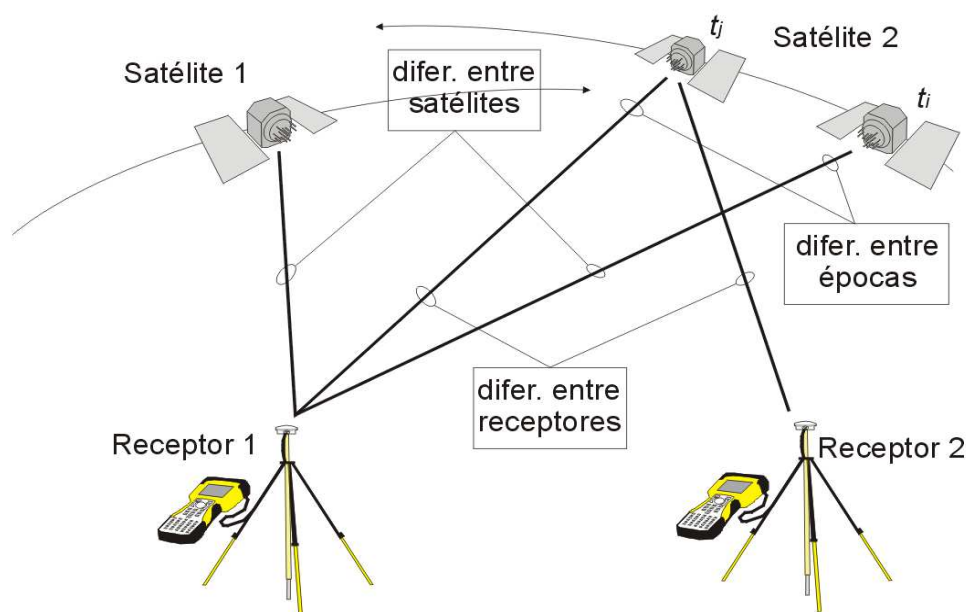


Figura 2.3.1: Esquema de algunas de las posibles combinaciones de los observables GPS (diferencias simples, dobles diferencias). Extraído de González (2010).

## **2.4. Estudios sobre la subsidencia en el Valle del Guadalentín**

### **2.4.1. Introducción**

Son varias las investigaciones realizadas sobre las causas y consecuencias de la subsidencia en el Valle del Guadalentín. A continuación se resumen los principales estudios y trabajos realizados hasta la fecha que tratan sobre la subsidencia en el Valle del Guadalentín, mostrando tanto la metodología de trabajo como los resultados obtenidos, que en algunos casos difieren unos de otros.

**2.4.2. Artículo "The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading". Nature Geoscience. DOI: 10.1038/NGEO1610. Pablo J. González, Kristy F. Tiampo, Mimmo Palano, Flavio Cannavó y José Fernández (2011)**

En este estudio de 2011, fruto de la colaboración del CSIC y la Universidad Complutense de Madrid, los autores observan unos datos de subsidencia en las inmediaciones de Lorca, en pleno valle del Alto Guadalentín, de aproximadamente 1,5 m en 15 años, con tasas de hundimiento anuales con valores máximos entre los 6 y 15 centímetros, obtenidos con técnicas de radar de apertura sintética interferométrico, como se puede observar en la Figura 2.4.1. Esto hace que sea una de las zonas con la tasa de hundimiento más rápido del mundo, por no mencionar que es el área más grande de Europa con una tasa tan alta, con aproximadamente 690 kilómetros cuadrados.

En el estudio se ha detectado que el Valle del Guadalentín, una amplia vega agraria y densamente poblada, se está hundiendo a una velocidad mayor que el resto de zonas agrícolas del continente. Además, los investigadores atribuyen la subsidencia a la sobreexplotación de los acuíferos del Guadalentín. No obstante, el estudio se centra más en vincular los efectos de la subsidencia sobre la sismicidad de la zona que en establecer las verdaderas causas de la subsidencia.

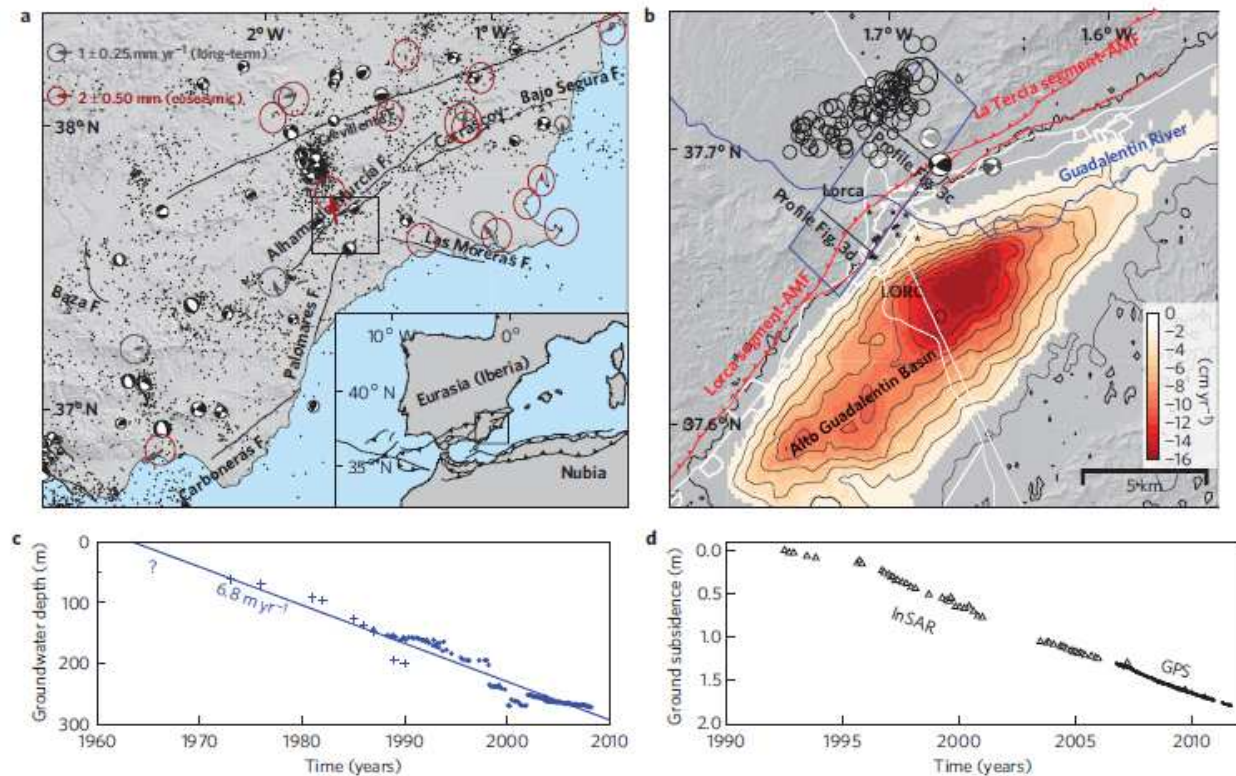


Figura 2.4.1: a) Localización y cinemática del terremoto de Lorca. La sismicidad del sureste de España (2000-2010), los mecanismos de coordinación (1970-2010), la velocidad a largo plazo GPS (2006-2011), gris y vectores cósmicos (rojo). Las fallas están etiquetadas. b) La ciudad de Lorca y la cuenca del Alto Guadalentín. IGN sismo principal mecanismos focales (negro), pre-shock (gris claro) y la mayor réplica (gris oscuro), y secuencia sísmica reubicada. Las estrellas negras son lugares de daño; las líneas rojas son fallas. Las curvas de nivel indican hundimientos de 2 cm/año detectadas por InSAR, debido a bombeo de aguas subterráneas. Azul rectángulo: proyección de la superficie de falla. AMF, Alhama de Murcia Falla. c) Agua Subterránea. Evolución profundidad desde diferentes fuentes de datos. d) InSAR (triángulos) y la línea de visión (LOS) projected GPS hundimientos en la superficie del suelo en la estación LORC.

Extraída de González et al. (2011).

El estudio revela una relación entre el hundimiento que sufre el terreno en Lorca y las características del terremoto tectónico que afectó al municipio el 11 de mayo de 2011. Los investigadores, aseguran que el segmento de terreno que se movió durante el seísmo coincide con la cuenca del Alto Guadalentín, una zona de extracción de agua subterránea.

El equipo de científicos, analizó desde 2006 las tasas de deformación del terreno del sureste de la península a partir de imágenes de satélite, confirma que el terremoto de magnitud 5,1 se produjo en la falla de Alhama de Murcia, la más activa de la región y

que el desplazamiento a lo largo de la falla tuvo lugar a una profundidad aproximada de tan solo dos o tres kilómetros.

“El estudio demuestra por primera vez que una variación del peso sobre la corteza terrestre, en este caso, debido a una disminución de carga por la extracción de agua subterránea en la cuenca del Alto Guadalentín, que registra una tasa de hundimiento de 10 centímetros al año, puede controlar las características de un terremoto tectónico”, en palabras del investigador del CSIC José Fernández, desde el Instituto de Geociencias, un centro mixto del CSIC y la Universidad Complutense de Madrid.

Además de identificar el segmento de la falla que se deslizó, los científicos han desarrollado un modelo de carga empleando los datos históricos de extracción de agua subterránea entre 1960 y 2010, así como el área de hundimiento detectada entre 1992 y 2007. “Este modelo nos permitió simular los cambios de esfuerzos acumulados en la corteza terrestre desde el comienzo de la extracción de agua y ver de qué modo y dónde afectaba a la falla de Alhama de Murcia. Sorprendentemente, ambos modelos coincidían en las zonas de máximo movimiento durante el terremoto y de máxima acumulación de energía por extracción de agua subterránea”, indican los investigadores.

En el estudio se utiliza por primera vez un modelo físico que cuantifica las diferentes variables que intervinieron en el terremoto, que se según concluyen se desencadenó “porque en la zona ya había acumulada mucha energía tectónica”.

#### **2.4.3. Tesis doctoral “ Monitorización de fenómenos geodinámicos aplicando técnicas GNSS”. Alberto Antón Merino (2014)**

En esta tesis doctoral, el objetivo es el estudio de los movimientos verticales del terreno en los alrededores de la localidad de Lorca mediante técnicas GNSS desde septiembre de 2009 hasta septiembre de 2012, sin embargo, estudia también su posible relación con la extracción de agua para riego del acuífero del Guadalentín, para lo cual el autor tras definir la tectónica y la hidrogeología de la zona realiza un estudio de la evolución



de los principales acuíferos (Alto Guadalentín y Bajo Guadalentín) a través de los perfiles hidrológicos de varios pozos.

El autor se basa en los datos de subsidencia de González et al. (2012), respecto a la tectónica determina que la zona de estudio se encuentra condicionada por los efectos de la falla de Alhama, una de las más activas de la región.

Respecto al acuífero, trabaja con los datos de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), según la cual el acuífero Guadalentín, con una superficie de 740 km<sup>2</sup>, consiste en dos acuíferos principales, el acuífero del Alto Guadalentín y el acuífero del Bajo Guadalentín, entre los que no existe transferencia de agua y que según la CHS se encuentran sobre explotados. Además de un acuífero más profundo que los otros dos, denominado Acuífero Profundo del Valle del Guadalentín, situado a unos 60 m de altitud sobre el nivel del mar (Figura 2.4.2).

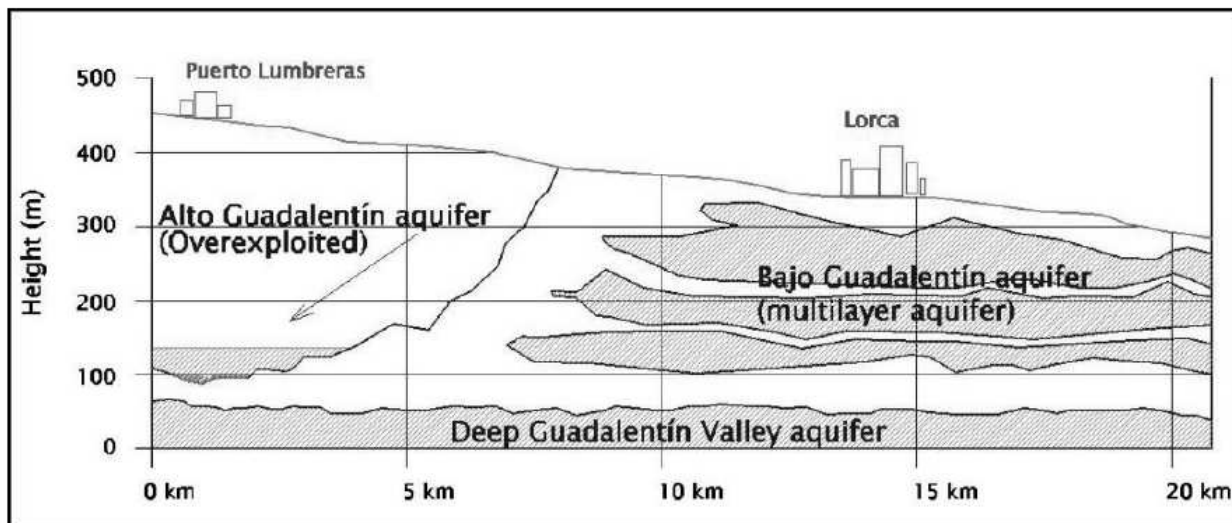


Figura 2.4.2: Perfil hidrogeológico longitudinal del Valle del Guadalentín, entre Lorca y Puerto Lumbreras, según los estudios geofísicos realizados en los años 70 por el IGME (Instituto Geológico y Minero de España). Estos estudios han sido confirmados por recientes sondeos profundos. Extraída de Antón (2014).

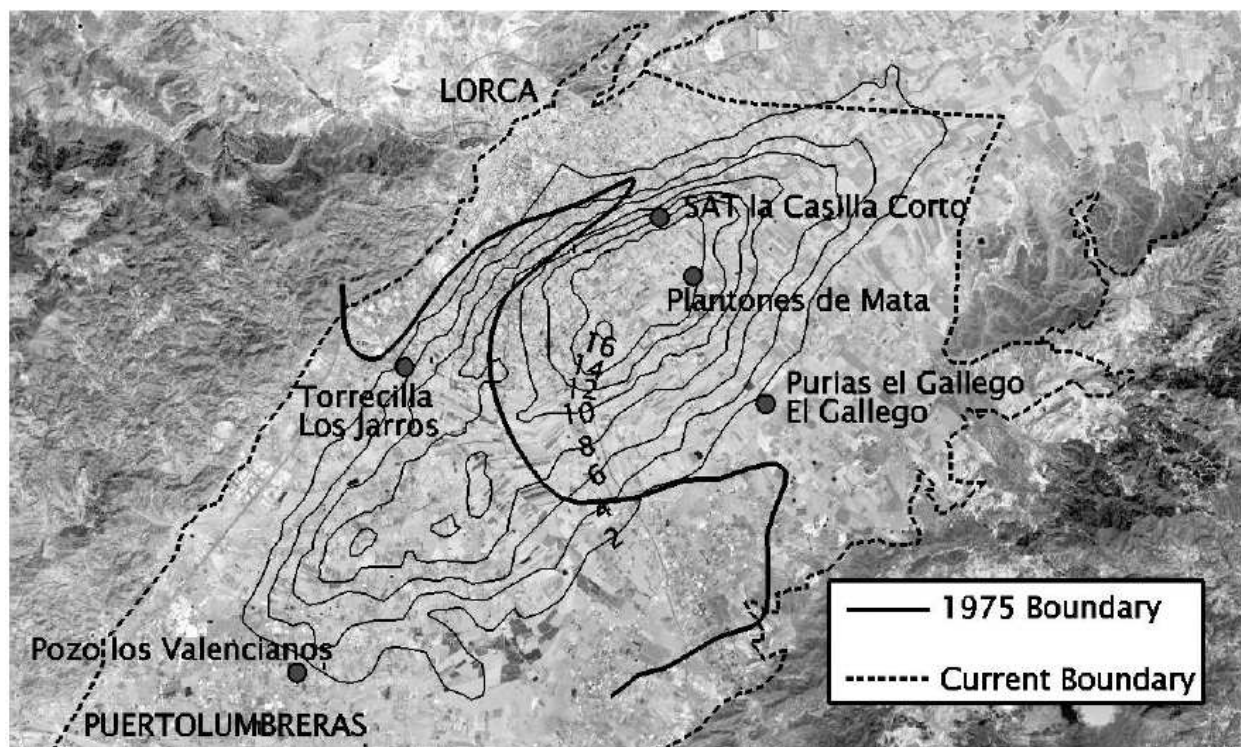


Figura 2.4.3: Situación de las líneas límite entre el acuífero del Alto Guadalentín y el acuífero del Bajo Guadalentín, línea límite actual y línea límite definida en 1975 por el Instituto Geológico y Minero de España (Instituto Geológico y Minero de España, 1975). Situación de los piezómetros estudiados. El curvado representa la tasa de hundimiento anual, en centímetros, detectada por González y Fernández, 2012 usando técnicas de interferometría de radar de satélite multitemporales. Bases imagen espacial: CNES / Spot Image, Digital Globe, Geo Eye, Instituto Andaluz de Cartografía, 2013. Extraída de Antón (2014).

A partir de ahí, el autor realiza un estudio hidrogeológico de la zona analizando los datos hidrológicos de ambos acuíferos.

### **Acuíferos del Bajo Guadalentín.**

Respecto al acuífero Bajo Guadalentín, se analizan los niveles de agua subterránea a través de los registros de los siguientes pozos.

En el acuífero del Bajo Guadalentín se pueden encontrar varias secciones permeables con niveles de agua subterránea independientes.

El acuífero del Bajo Guadalentín, conocido como acuífero multicapa del Valle del Guadalentín, se extiende desde Lorca a Murcia, la línea divisoria entre el Bajo

Guadalentín y el Alto Guadalentín se considera casi coincidente con la carretera Lorca-Vado (Instituto Geológico y Minero de España, 1975). En las figuras siguientes, de Figura 2.4.4 a Figura 2.4.6 se muestra la evolución de los niveles de agua subterránea del acuífero en los últimos años.

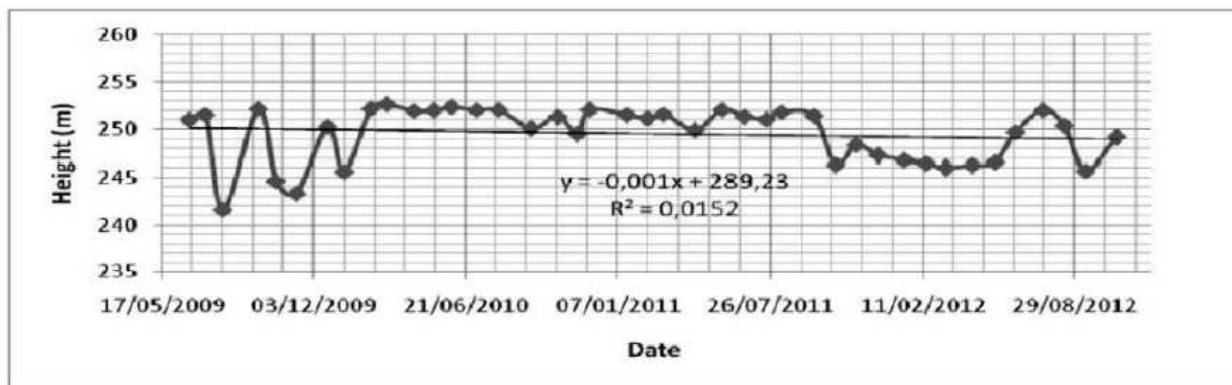


Figura 2.4.4: Gráfica de la evolución piezométrica del pozo Sat La Casilla Corto, localizado 3,5 km. al sureste de Lorca. Elaborada a partir de datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Extraída de Antón (2014)

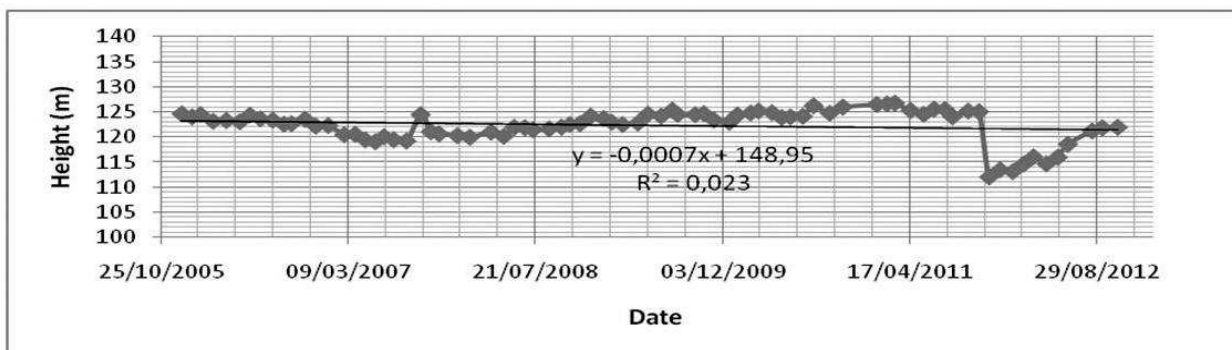


Figura 2.4.5: Gráfica que muestra la evolución piezométrica del pozo Plantones de Mata, ubicado 4,1 kilómetros al sureste de Lorca. Elaborada a partir de datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Extraída de Antón (2014).

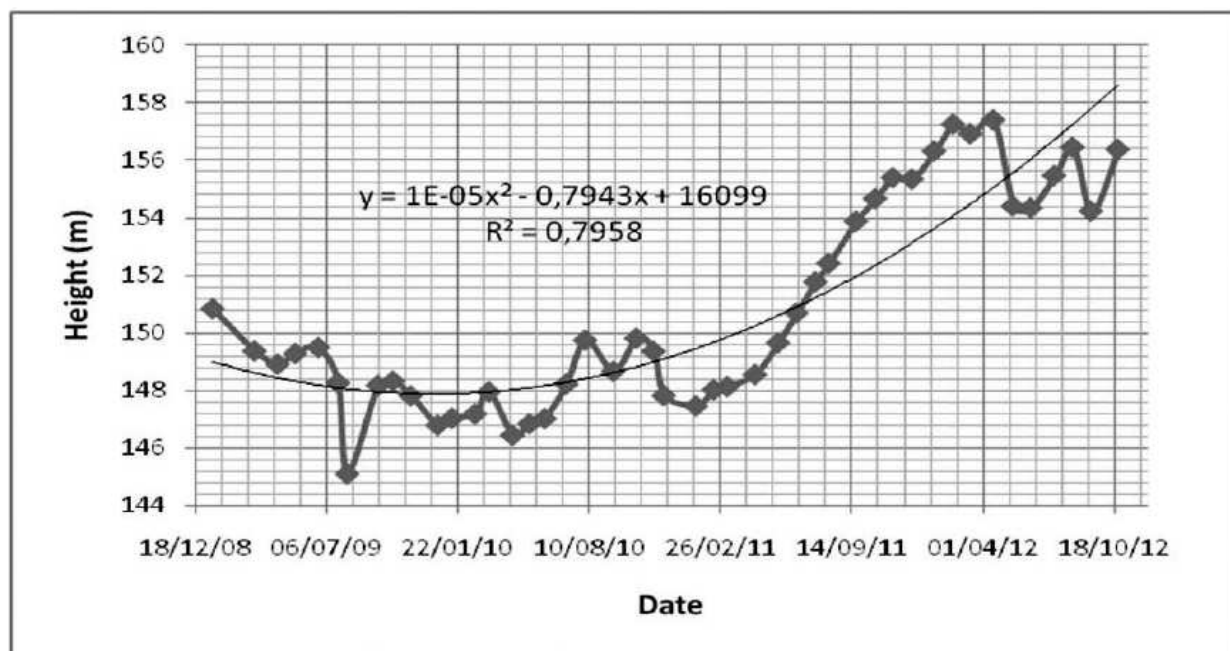


Figura 2.4.6: Gráfica que muestra la evolución piezométrica del pozo El Gallego, ubicado a 7 kilómetros al sureste de Lorca. Elaborada a partir de datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Extraída de Antón (2014).

### Acuífero del Alto Guadalentín.

El acuífero del Alto Guadalentín está constituido por una barrera natural de arcillas margosas que separa la cuenca sedimentaria de Puerto Lumbreras.

Hasta llegar a una profundidad de 200-250 m, la parte superior de la cuenca se compone principalmente de grava y arena gruesa, posiblemente transportada desde las ramblas del norte en Torrecilla, Béjar y Nogalte. Se trata de un acuífero que ha dado una producción de agua muy alta desde finales de los años 50 del siglo XX, con caudales superiores a 100 litros por segundo a poca profundidad, lo que fomentó la proliferación de pozos en las décadas siguientes, todo lo anterior, unido a la impermeabilidad de los bordes laterales, y que la recarga y la conexión con el resto del valle es imposible, ha contribuido a que se haya producido una sobreexplotación del acuífero, ya que la extracción de agua ha superado la recarga del mismo.

Del estudio de los niveles de agua subterránea estudiados, se puede decir que el

del Alto Guadalentín, formado por una cuenca detrítica que ocupa sólo el 15% del valle, situado al lado de Puerto Lumbreras, es el único acuífero sobre explotado.

Los gráficos de evolución piezométrica, como se muestra en Figura 2.4.7 y Figura 2.4.8, indican que el acuífero está sobre explotado.

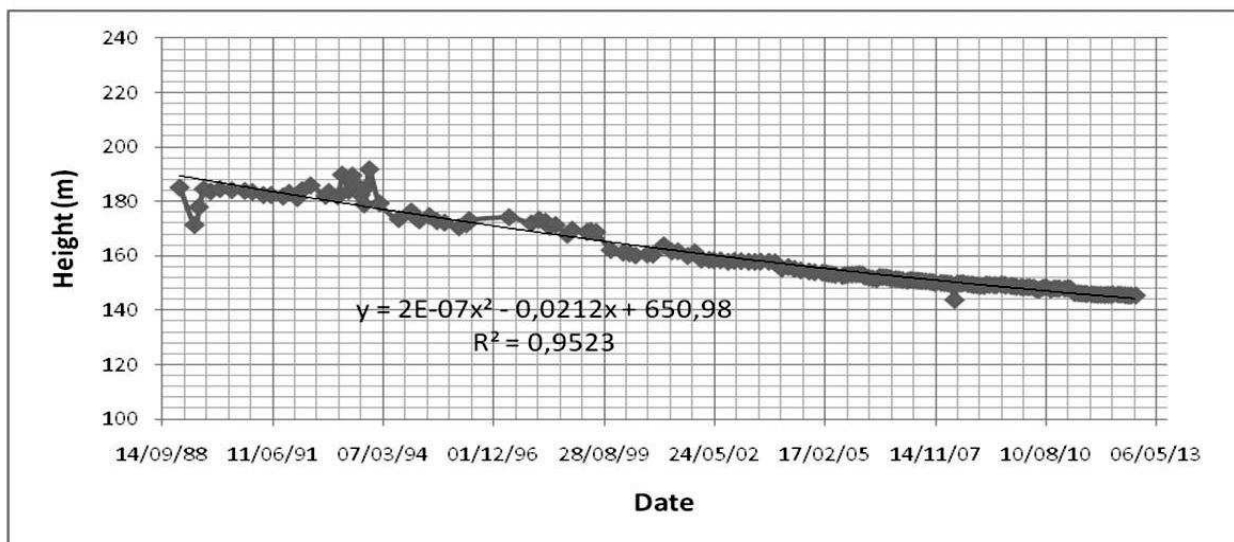


Figura 2.4.7: Gráfica que muestra la evolución piezométrica del pozo Los Valencianos, ubicado a 3 km al suroeste de Lorca. Elaborada a partir de datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Extraída de Antón (2014).

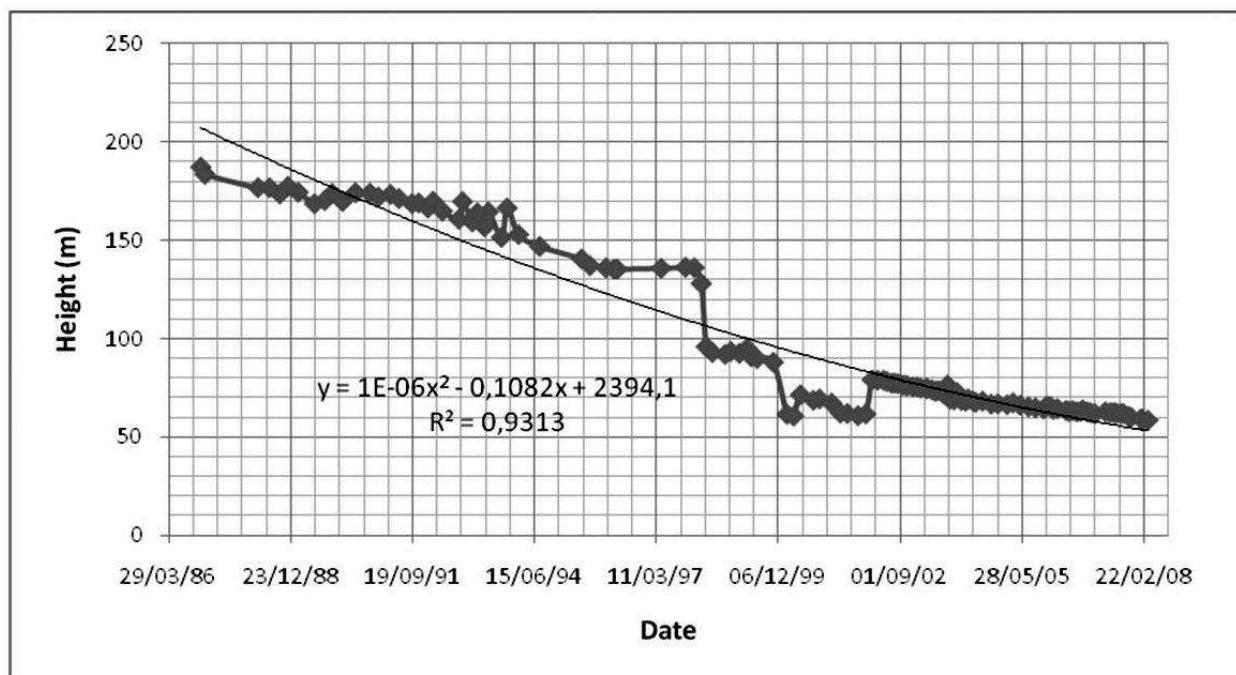


Figura 2.4.8: Gráfica que muestra la evolución piezométrica del pozo Los Jarros, ubicado a 3 km al suroeste de Lorca. Elaborada a partir de datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Extraída de Antón (2014).

## Acuífero profundo del Valle del Guadalentín.

Por último, el acuífero Profundo del Valle del Guadalentín se encuentra por debajo de los anteriores, a una altitud de alrededor de 50-60 m sobre el nivel del mar. Varios sondeos realizados por la Confederación Hidrográfica del Segura evidencian la existencia de este acuífero profundo, como los estudios realizados por José María Montes y Francisco Turrión Peláez (Turrión, 2012). Como se muestra en la Figura 2.4.9 no se trata de un acuífero sobreexplotado, y sus niveles incluso muestran una tendencia creciente.

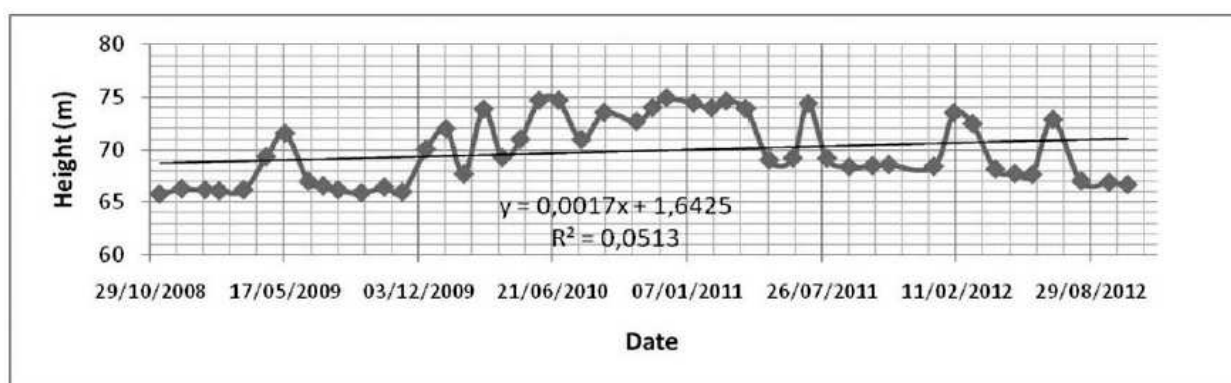


Figura 2.4.9: Gráfica que muestra la evolución piezométrica del pozo Torre cilla, situado a 2.5 km al sureste de Lorca. Elaborada a partir de datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Extraída de Antón (2014).

Por otra parte, el autor obtiene mediciones de subsidencia entre 2008 y 2012 a través de dos estaciones LORC (REGAM) y LORC (MERISTEMUM).

“Al comparar varios grupos de coordenadas de la misma estación, calculados en diferentes momentos, los cambios en estas coordenadas tridimensionales se pueden usar para cuantificar el movimiento de la superficie y la velocidad” (Chang, 2000).

Partiendo de las coordenadas obtenidas para cada estación permanente GNSS en el periodo calculado, se observa una subsidencia, como muestra la altura de las dos estaciones de Lorca en Figura 2.4.10 y Figura 2.4.11. Concretamente unas tasas de hundimiento de 0.80 cm/año en la estación de LORC (REGAM) y 8.64 cm/año para la

estación LORC (MERISTEMUM).

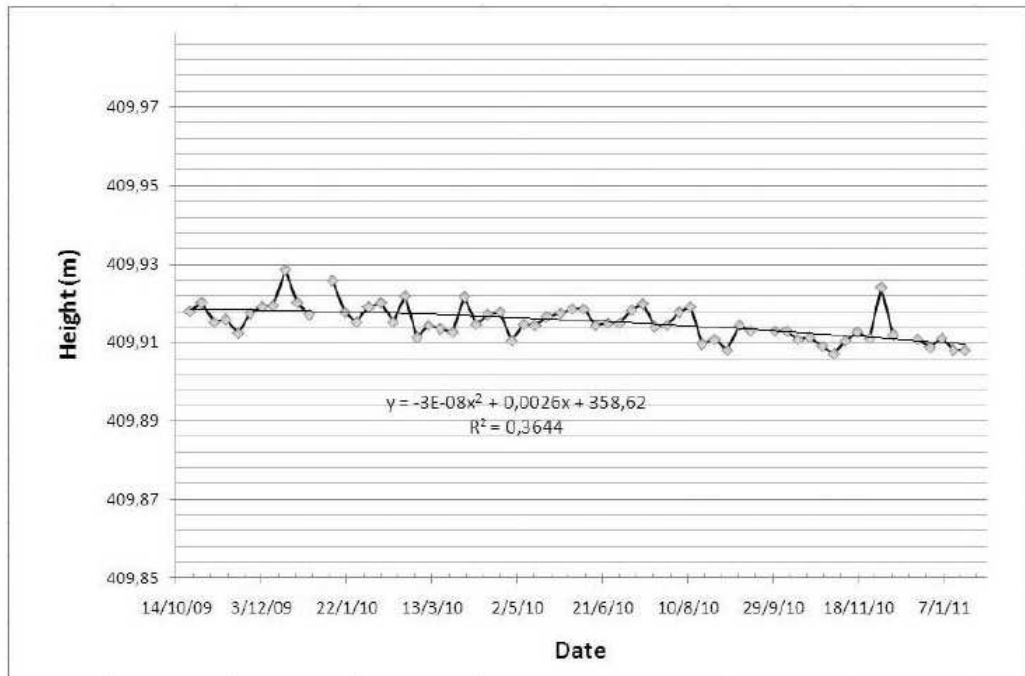


Figura 2.4.10: Variación en altitud en la estación LORC (REGAM) durante el período estudiado. Extraída de Antón (2014).

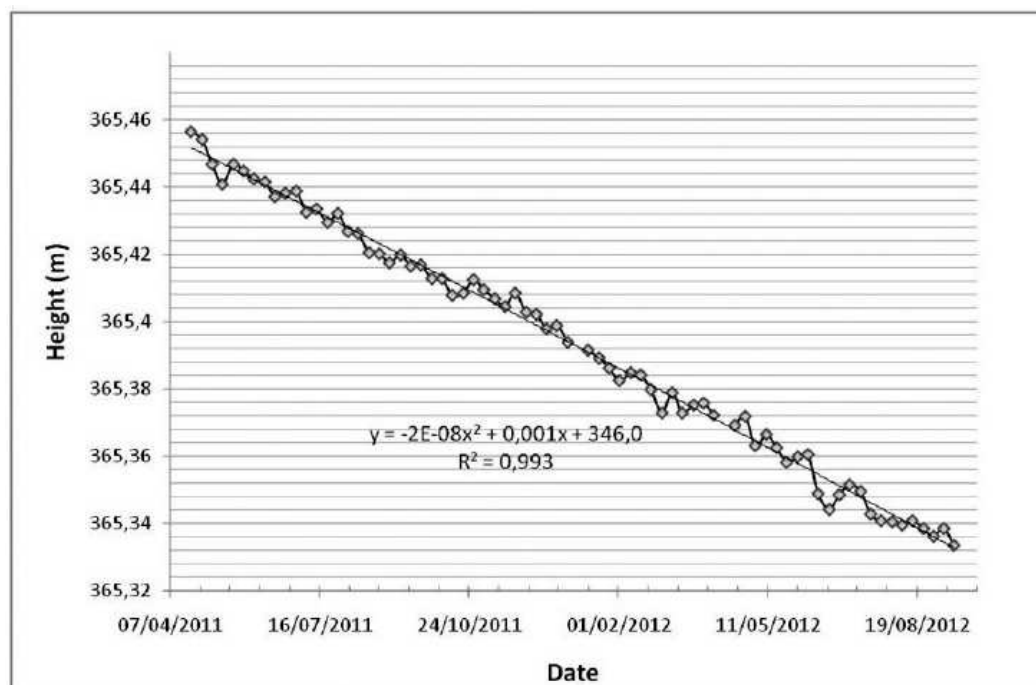


Figura 2.4.11: Variación en altitud en la estación LORC (MERISTEMUM) durante el período estudiado. Extraído de Antón (2014).



Estas tasas de subsidencia se corresponden en magnitud y posición, con los valores calculados obtenidos por técnicas de interferometría radar diferencial por González y Fernández (González et al., 2011), que se muestran en la Figura 2.4.1.

Por lo tanto no cabe duda de que la existencia de subsidencia en Lorca es un hecho.

Sin embargo siguen existiendo expertos que opinan que no está clara la causa de dicha subsidencia. Según los estudios realizados por González y Fernández, la subsidencia se debe a la extracción de agua (González et al., 2011.), sin embargo, como se sostiene en el trabajo de Antón no existe sobreexplotación de la totalidad de los pozos en el área afectada por subsidencia.

La zona de subsidencia más acusada se encuentra entre los acuíferos del Alto Guadalentín y Bajo Guadalentín, siendo el este último el único sobreexplotado, según los datos piezométricos. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el acuífero del Alto Guadalentín sólo ocupa el 39% de la zona afectada por la subsidencia, el autor concluye que la mayor parte del área con la mayor tasa de hundimiento no está afectada por la sobreexplotación de agua.

Otro motivo para dudar de que la sobreexplotación sea la causa de la subsidencia, es la presencia de una barrera impermeable entre el acuífero de Alto Guadalentín y el acuífero del Bajo Guadalentín, como se demuestra por los estudios geofísicos del Instituto Geológico y Minero de España. Dicha barrera se debería reflejar en el curvado de tasa de hundimiento, teniendo en cuenta que es una barrera entre dos zonas con diferente comportamiento hidrogeológico, al tratarse el acuífero del Alto Guadalentín de una pequeña cuenca detrítica, mientras que el acuífero del Bajo Guadalentín es un acuífero multicapa formado por varias secciones permeables con niveles de aguas subterráneas independientes.

“Por lo tanto, se debe buscar otra razón para justificar la subsidencia observada” según Antón (2014).

A partir de ahí, el autor propone dos posibles causas para la subsidencia en la zona.

La primera de ellas puede estar relacionada con los procesos de “piping” asociados con el gran número de pozos, muchos de los cuales son ilegales y algunos en desuso, en la zona afectada por la subsidencia, “en los que el agua está decantando continuamente sedimentos de la parte superior a la inferior del acuífero. Este fenómeno se ha documentado en el área de estudio (Figura 2.4.12). En el siguiente enlace, además, se puede ver un vídeo que muestra lo que argumenta el autor, <http://www.youtube.com/watch?v=3uBBly8LhOA>. Sin embargo, teniendo en cuenta la magnitud de la subsidencia observada, el volumen de material desplazado debería ser muy alto, y por lo tanto la subsidencia no puede atribuirse únicamente a fenómenos de “piping”. Por lo tanto, se deben buscar causas adicionales para explicar la subsidencia encontrada” (Antón, 2014).



Figura 2.4.12: Fenómenos de “piping” observados en el área de subsidencia. A: fotografía tomada cerca de Santa Gertrudis. Extraída de Antón (2014).

La segunda explicación para la subsidencia observada “podría estar relacionada con la configuración tectónica del basamento metamórfico paleozoico. De acuerdo con los estudios geofísicos y perforaciones profundas, el Alto Guadalentín tiene una estructura de graben; un horst tectónico se puede observar dentro de la zona hundida, que está delimitada por fallas N 60 E, el horst está interrumpido y desplazado lateralmente por otras fallas N 120 E, que tienen un desgarro dextral predominante (el bloque oriental se mueve al sur y el occidental al norte). Se han detectado fallas normales con rumbo N 150-170 E cruzando el horst” (Rodríguez Estrella et al., 1996).

“Durante la visita a la zona, se observó una grieta kilométrica absolutamente lineal, la grieta tenía una anchura de 0,5 a 3 m, una profundidad de 1 a 5 m y una dirección de N 160 E, que coincide con la falla normal descrita por Rodríguez Estrella et al. (1996) en el año 1987. Esta grieta evidencia la existencia de distensión neotectónica en el área de estudio. Rodríguez Estrella et al. (1996) señalan que se ha producido esta actividad distensiva desde el Mioceno Tardío” (Antón, 2014).

“La actividad distensiva, asociada con los esfuerzos oro génicos de dirección casi NS, podría ser la causa de la subsidencia. Además, este mecanismo tectónico explica la intensa actividad de “piping” observada en el área de estudio” (Antón, 2014).

#### **2.4.4. Artículo en revisión “Multi-sensor advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: Alto Guadalentín Basin (Spain)”. Roberta Boni et al.**

La autora estudia la evolución de la severa incidencia de la subsidencia experimentada en la cuenca del Alto Guadalentín (Figura 2.4.13) durante un periodo de 20 años, a través de monitorización mediante técnicas de “Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar” (DinSAR),

Las imágenes SAR se han obtenido a través de los datos de los 4 satélites ERS-1/2, ENVISAT, ALOS y COSMO-SkyMed, durante el periodo de 1992 a 2012.

Por otra parte, los resultados generados se han sido validados mediante medidas GPS

(Global Positioning System). Los errores medios absolutos son los siguientes:  $4,6 \pm 4$  mm para los datos ALOS y  $4,85 \pm 3,5$  mm para los datos COSMO-SkyMed.

El estudio revela una correlación directa entre el espesor de los depósitos aluviales compresibles y los desplazamientos superficiales obtenidos mediante análisis DinSAR (Figura 2.4.17).

Por otra parte, la comparación entre los datos piezométricos y los desplazamientos DinSAR, revelan un cierto tiempo de retardo entre los cambios de nivel piezométrico y la evolución de los cambios superficiales del terreno (Figura 2.4.14 y Figura 2.4.16).

Según el estudio, la subsidencia del terreno detectada en los últimos 20 años es, sobre todo, una consecuencia del descenso de 100 a 200 m en el nivel del agua subterránea desde los años 70 del siglo pasado debido a la explotación del sistema acuífero de la cuenca del Alto Guadalentín.

La superposición de mapas de desplazamientos de la superficie del terreno de diferentes periodos de tiempo permite cuantificar datos de subsidencia de más de 2,5 m de subsidencia acumulada entre 1992 y 2012 en la cuenca del Alto Guadalentín (Figura 2.4.15).

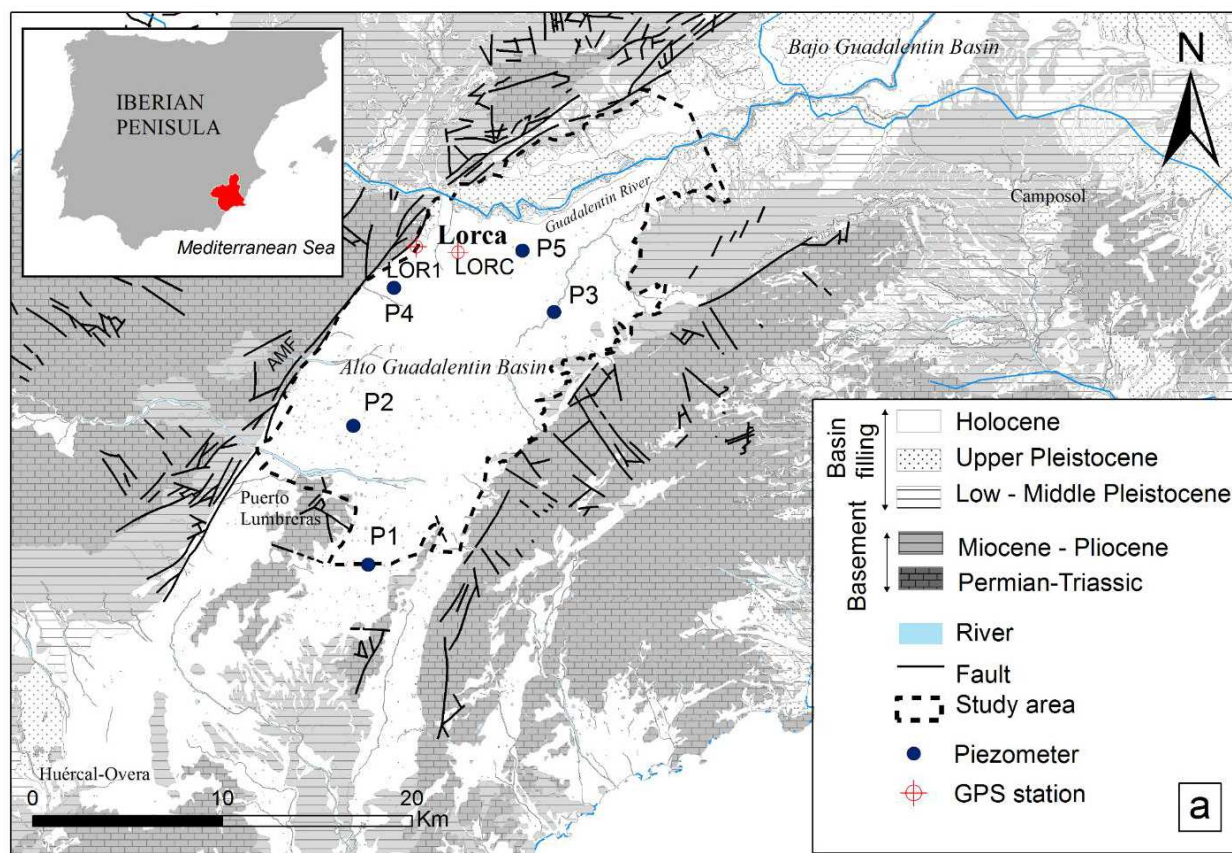


Figura 2.4.13: (a) Explotación Geológica de la Cuenca del Guadalentín (Martín et al., 1972) ; piezómetros y los sitios de GPS utilizados en este área de estudio. Extraído de Boni (en revisión).

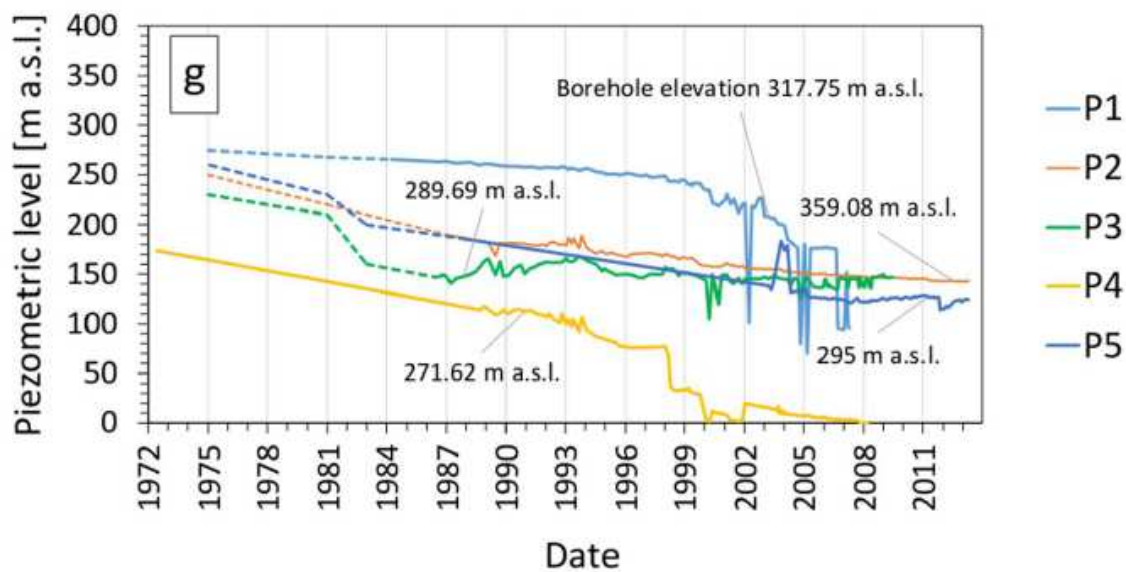


Figura 2.4.14: Evolución del nivel piezométrico en el sistema acuífero del Alto Guadalentín. Extraída de Boni (en revisión).



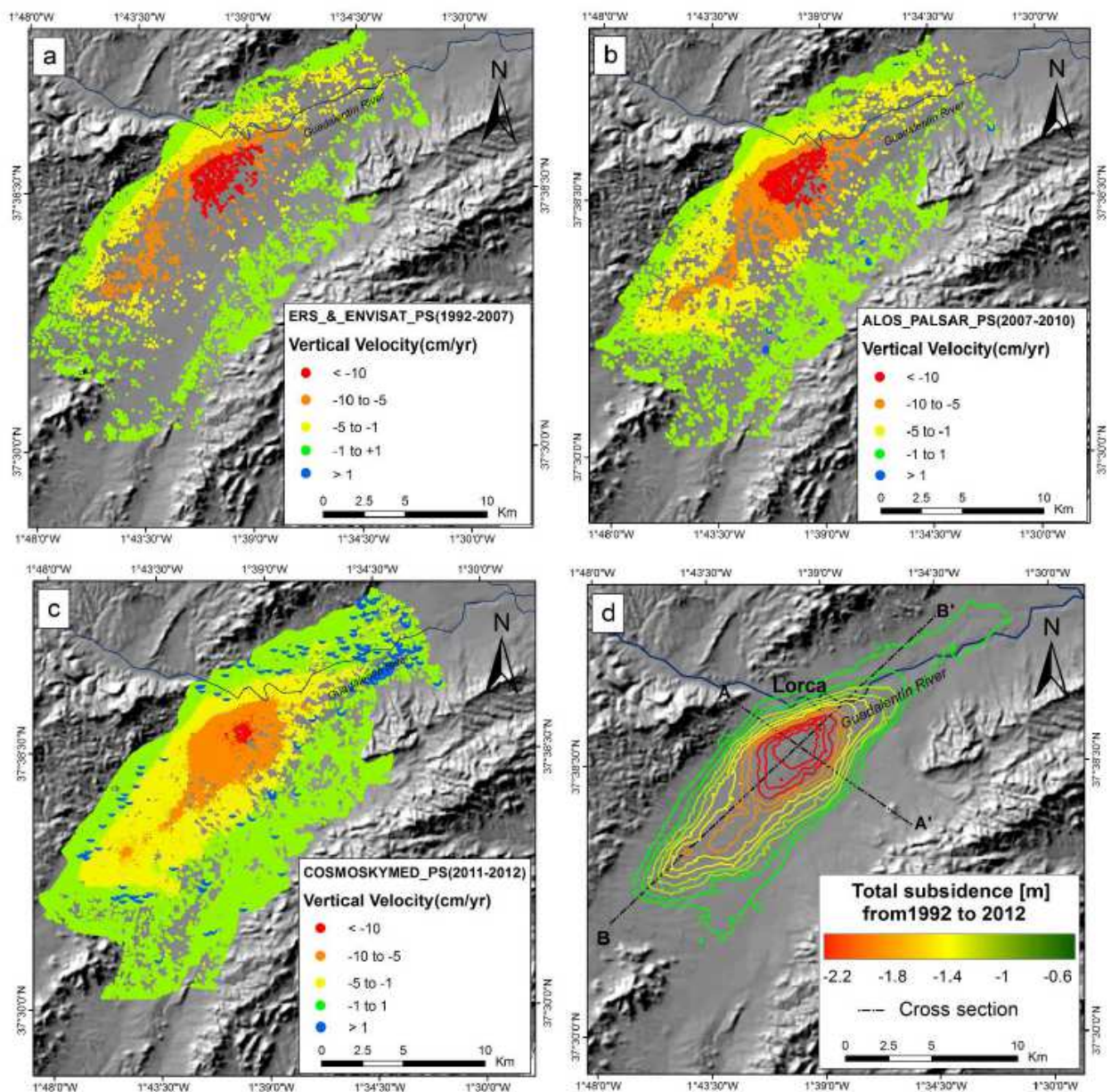


Figura 2.4.15: Evolución de la subsidencia en la cuenca del Alto Guadalentín. (a) periodo 1992-2007, (b) periodo 2007-2010, (c) periodo 2011-2012, (d) datos acumulados totales del periodo 1992-2012. Extraída de Boni (en revisión).

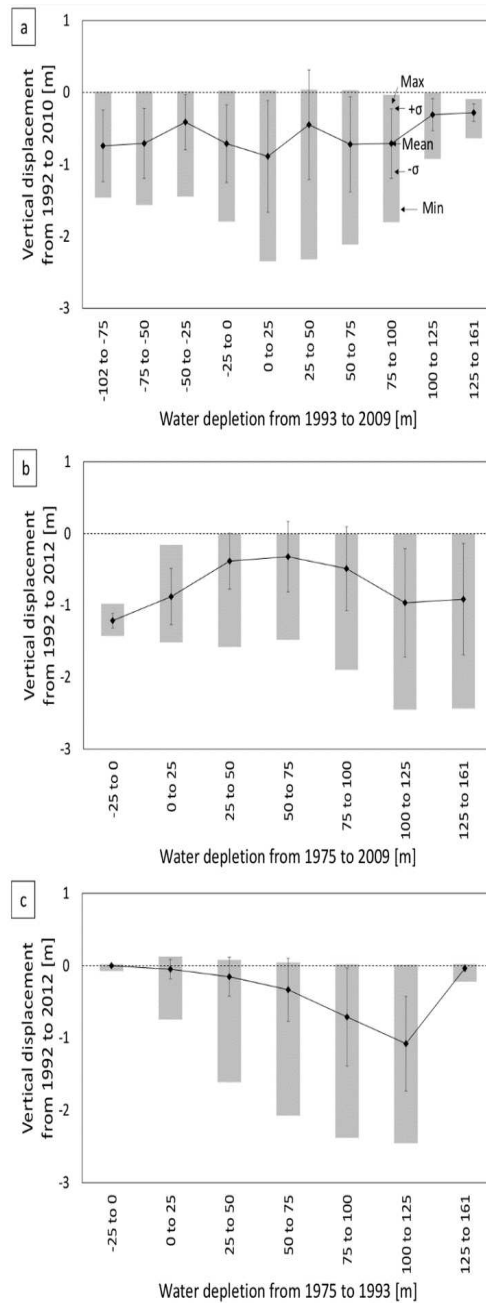


Figura 2.4.16: (a) Comparación entre desplazamientos verticales (m) en periodo 1995-2010 (ERS & ENVISAT and ALOS dataset), con el descenso de nivel piezométrico desde 1993 a 2009. (b) Relación entre la subsidencia total de 1992 a 2012 con el descenso de nivel freático de 1972 a 2009. (c) Comparación entre la subsidencia total entre 1992 y 2012 con el descenso de nivel piezométrico entre 1975 y 1993. Extraída de Boni (en revisión).



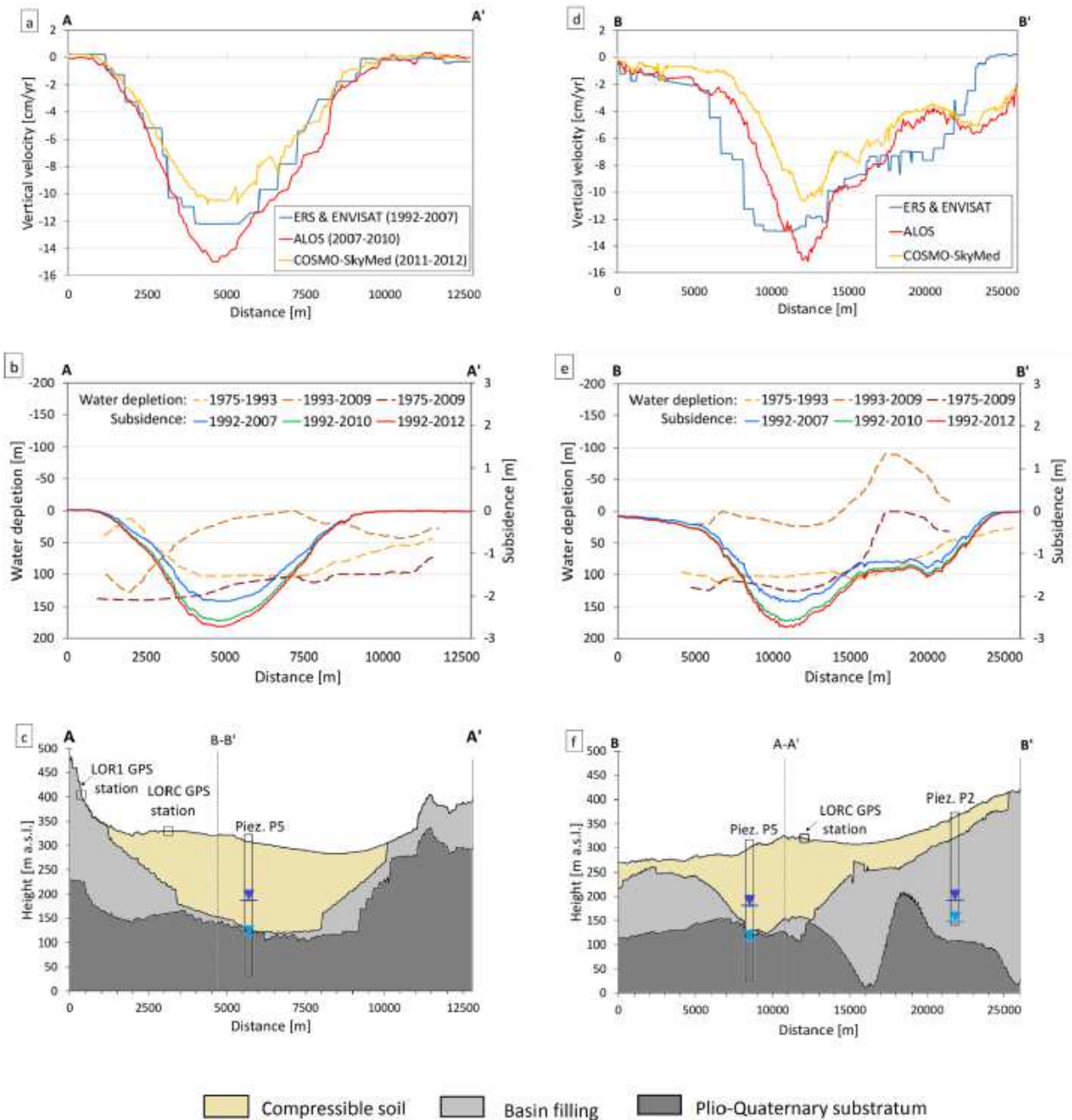


Figura 2.4.17: Figura E. Perfil de las tasas de deformación de los datos InSAR (a) (d) y comparación de los desplazamientos verticales con el agotamiento del agua (líneas de puntos) (b) (e) por la A-A' (c) y BB' (f) cortes geológicos. Extraída de Boni (en revisión).

#### 2.4.5. Datos de subsidencia en la cuenca del Alto Guadalentín obtenidos por InSAR, entre 1992 y 2012

A continuación se muestran los mapas preliminares de asiento y de distorsión elaborados por el IGME, con los datos de dos periodos de InSAR. Como se puede observar, aunque la magnitud de la subsidencia es muy grande, debido a la extensión de la zona afectada, los gradientes (distorsiones angulares) son bajos y por tanto, las zonas en las que se superan los umbrales admisibles (estados límite de servicio) son escasas. Ver de Figura 2.4.18 a Figura 2.4.22.

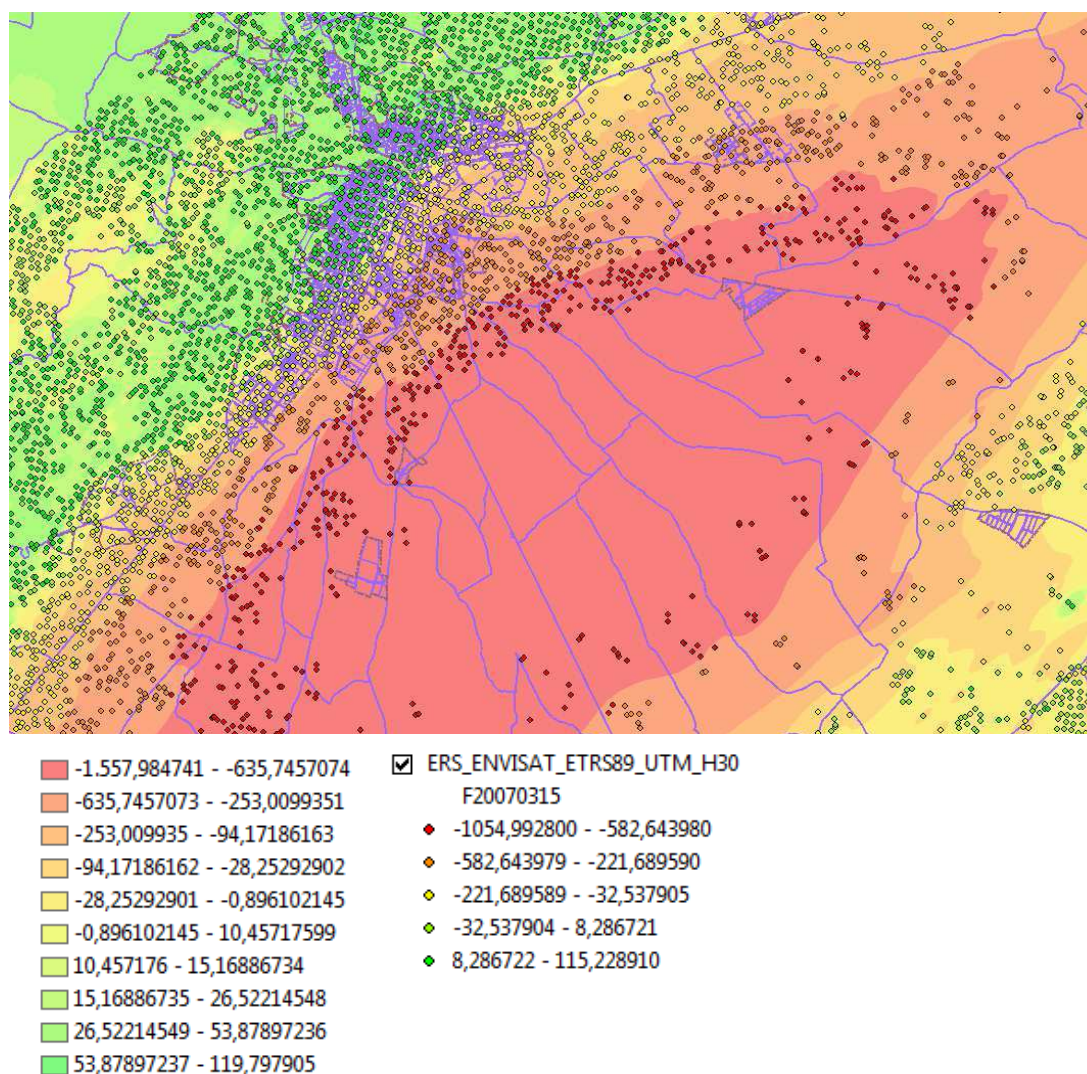
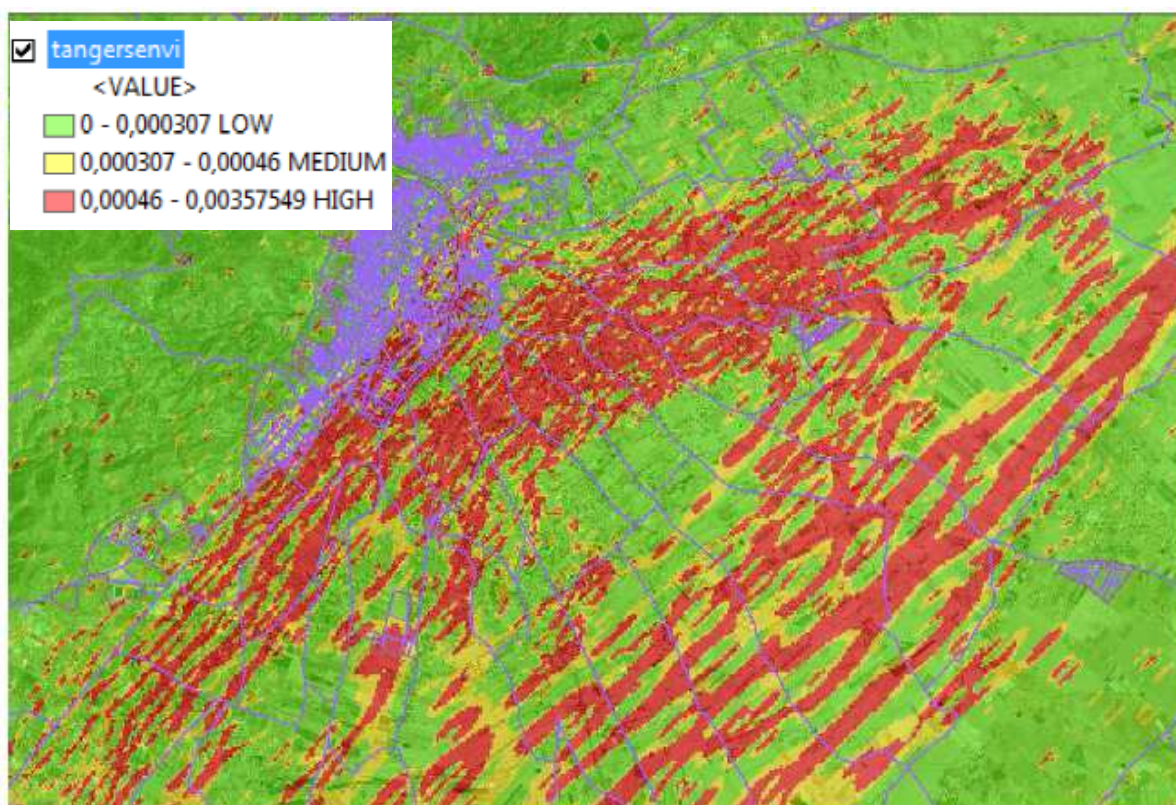


Figura 2.4.18: Valores preliminares en mm de subsidencia del terreno para el periodo 1992-2007 según datos InSAR mediante ERS-ENVISAT. Fuente: Margarita Sanabria (IGME).





Expected structural damage level due to foundation settlements	Maximum angular distortion ( $\beta_{\max}$ )	Maximum differential settlement ( $\delta_s \max$ )	Maximum angular distortion projected along the LOS, $\beta_{\max-\text{los}}$ (Eq. 6)	Maximum differential settlement projected along the LOS, $\delta_s \max-\text{los}$ (Eq. 4)
<b>Negligible</b>	$< 1/3000$	$< 25 \text{ mm}$	$< 3.07 \times 10^{-4}$	$< 23.01 \text{ mm}$
<u>Medium</u>	$1/3000 - 1/2000$	–	$3.07 \times 10^{-4} - 4.60 \times 10^{-4}$	–
<i>High</i>	$> 1/2000$	$> 25 \text{ mm}$	$> 4.60 \times 10^{-4}$	$> 23.01 \text{ mm}$

Figura 2.4.19: Valores preliminares de distorsión angular máxima, calculados con ArcGIS Slope, del terreno para el periodo 1992-2007 según datos InSAR mediante ERS-ENVISAT. Fuente: Margarita Sanabria (IGME).

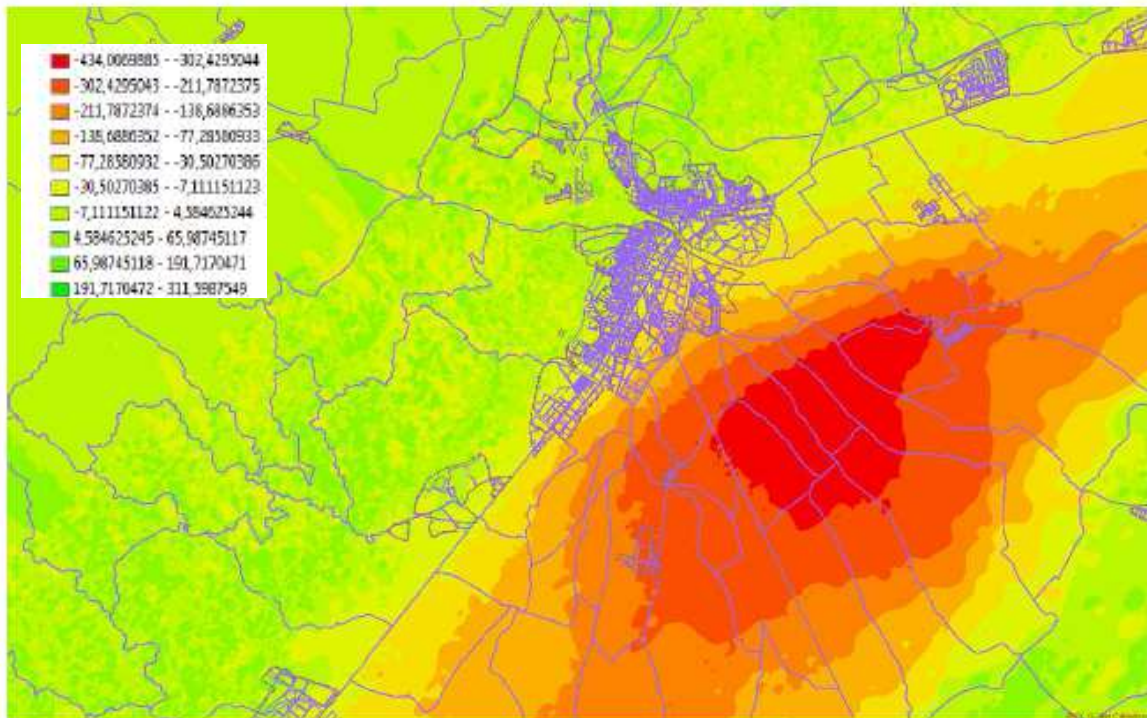


Figura 2.4.20: Valores preliminares en mm de subsidencia del terreno para el periodo 2007-2010 según datos InSAR mediante ALOS. Fuente: Margarita Sanabria (IGME).

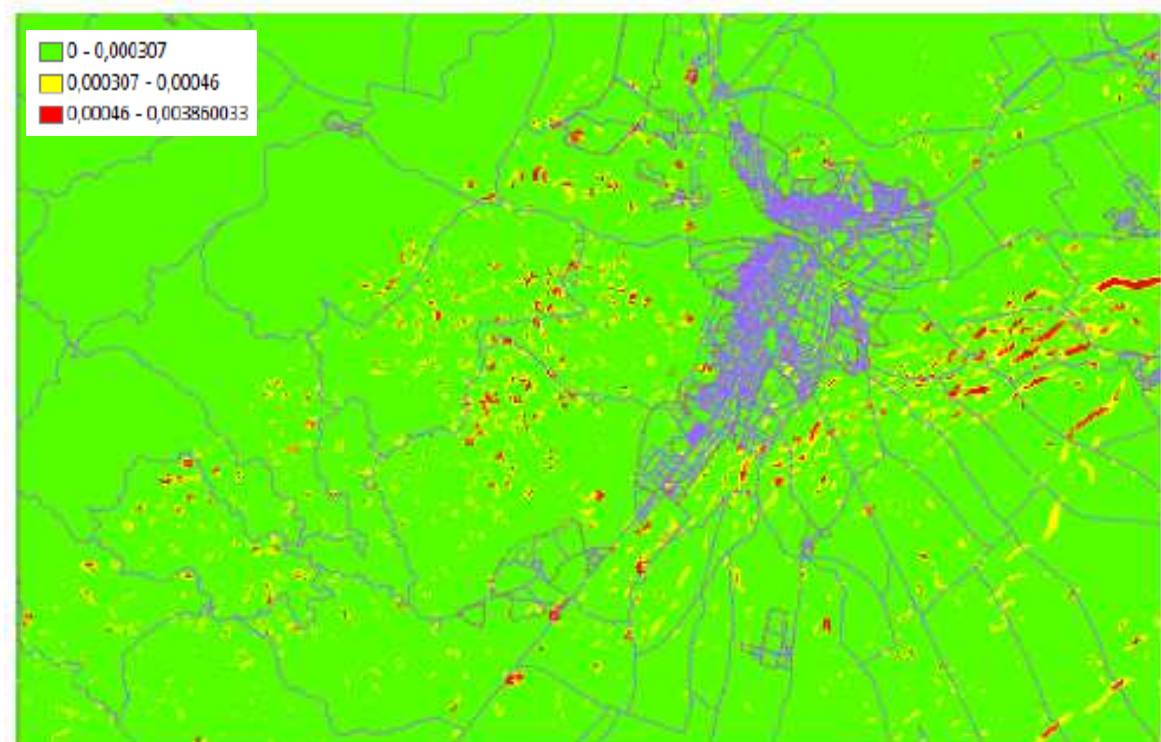


Figura 2.4.21: Valores preliminares de distorsión angular máxima, calculados con ArcGIS Slope, del terreno para el periodo 2007-2010 según datos InSAR mediante ALOS. Fuente: Margarita Sanabria (IGME).



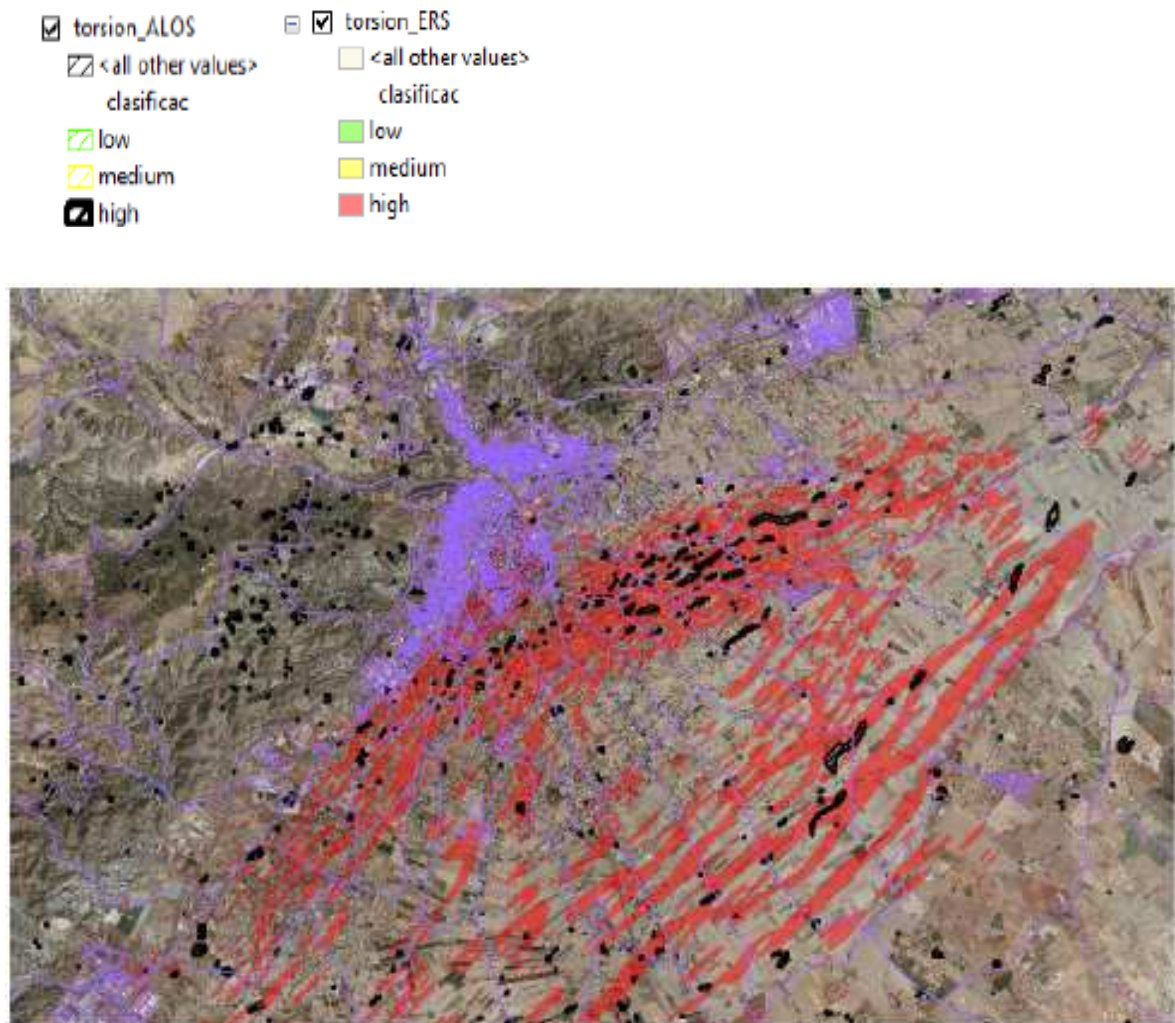


Figura 2.4.22: Figura 2.4.22: .Comparación de la distorsión máxima con la función de ArcGIS Slope para los periodos 1992-2007 ENVISAT y 2007-2010 ALOS. Fuente: Margarita Sanabria (IGME).

#### **2.4.6. Artículo “Deformación cortical de las Béticas Orientales observada mediante GPS y su relación con el terremoto de Lorca”. Anna Echeverría, Giorgi Khazaradze, Eva Asensio, Jorge Gárate y Emma Suriñach (2012)**

Tomando como punto de partida el sismo de Mw 5,2 que tuvo lugar en la zona el 11 de mayo de 2011, y que se atribuye a la Falla de Alhama de Murcia (FAM), una de las fallas más activas del SE de la Península Ibérica, en este artículo, los autores analizan y caracterizan el campo inter-sísmico de velocidades de la zona. Las estaciones situadas entre la costa Mediterránea y la falla presentan las máximas velocidades de la zona (entre 1,4 y 1,8 mm/a) con una orientación NNO, oblicuas a la traza de la falla. La cinemática de la falla deducida a través de las tasas de deformación obtenidas a partir de los vectores GPS de la red CuaTeNeo coincide con el mecanismo focal obtenido para el terremoto.

Mediante el análisis de las cinco campañas GPS de la red CuaTeNeo realizadas entre 1997 y 2011 se ha caracterizado el campo inter-sísmico de velocidades de la zona de forma que las velocidades de las estaciones más cercanas a la Falla Alhama de Murcia detectan el carácter inverso y de desgarre de la misma.

El análisis en detalle de la estación GPS continua, en Lorca, permite la detección de un salto co-sísmico de unos 6 mm hacia el Norte.

Según los autores, “El terremoto de Lorca se atribuye a la FAM, la traza de la cual pasa por Lorca. (IGME, 2011; Vissers and Meijninger, 2011). Martínez-Díaz (2012) propone como fuente del terremoto el área entre los segmentos de Goñar-Lorca y Lorca-Totana, formada por una compleja estructura. Los mecanismos focales publicados (López-Comino et al., 2012) muestran una componente de desgarre sinistral e inversa, donde la traza de uno de los planos nodales coincide con la orientación general de la falla” (Figura 2.4.23). “La relocalización de los sismos principales y las réplicas, recientemente publicadas por López-Comino (2012), se sitúan al norte y alineadas paralelamente a la traza superficial de la FAM” (Figura

2.4.23), "no obstante en el reconocimiento de campo, no se detectaron rupturas superficiales" (IGME, 2011)".

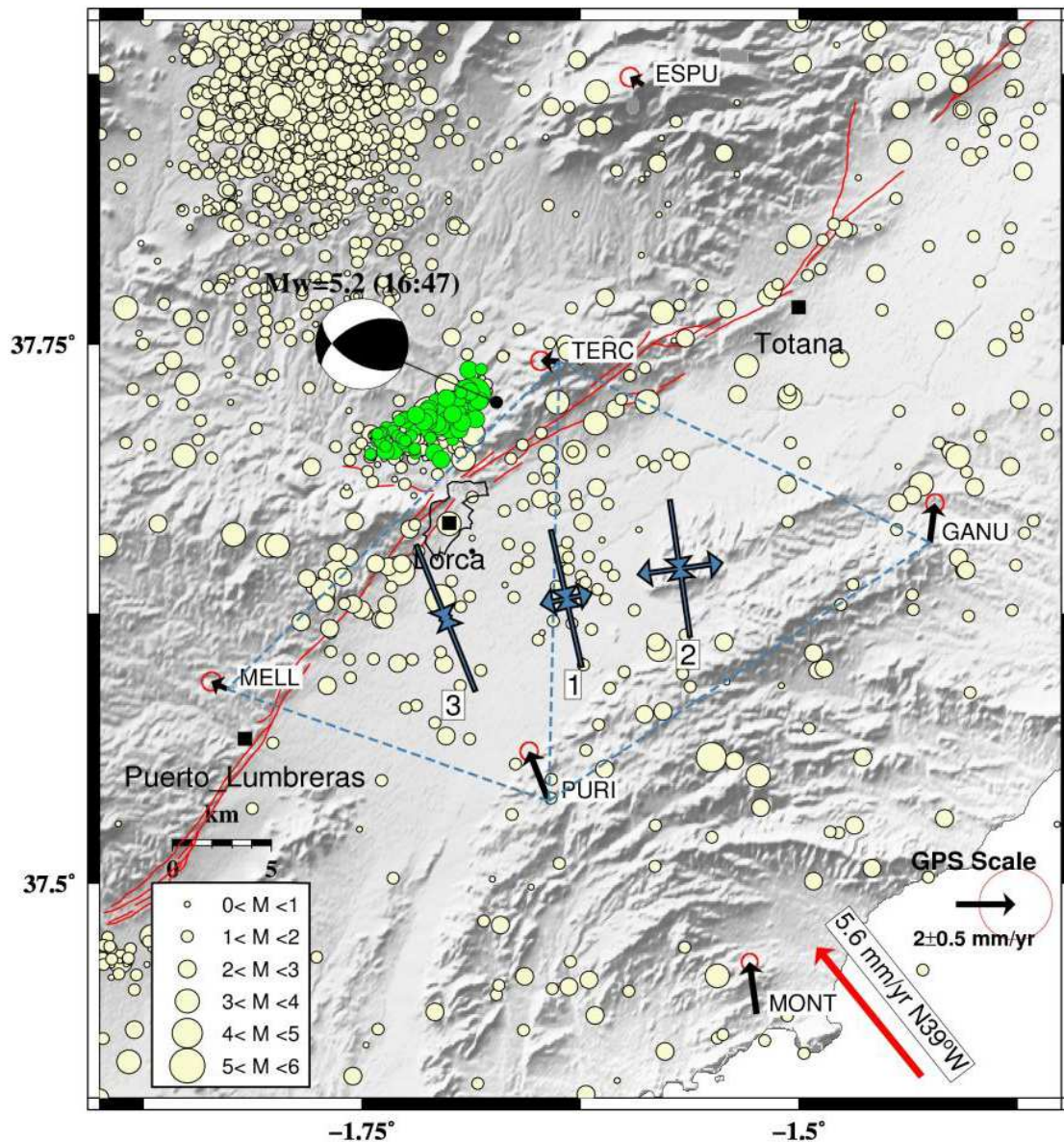


Figura 2.4.23: Localización del mecanismo focal del terremoto principal (Mw5.2) de Lorca de 11/05/2011 junto con las réplicas (color verde) según López-Comino (2012). La sismicidad instrumental del catálogo del IGN ([www.ign.es](http://www.ign.es)) está representada con círculos amarillos. Las velocidades horizontales de las estaciones GPS de la red CuaTeNeo están respecto a Eurasia. Las tasas de deformación estimadas a partir de las velocidades de las estaciones TERC, MELL, PURI y GANU están indicadas con las flechas azules (ver Tabla 1). El vector rojo indica la convergencia entre las placas Eurasiática y Nubia según el modelo MORVEL (DeMets et al., 2010). La traza de la Falla de Alhama de Murcia ha sido obtenida de Martínez-Díaz, (1998) y García-Mayordomo (2010). Extraída de Echeverría et al. (2012).



En la ciudad de Lorca existen dos estaciones de referencia GPS con registro continuo (CGPS), una perteneciente a la red Meristemum, de la Dirección General de Patrimonio Natural y Biodiversidad (<http://gps.medioambiente.carm.es/>), y la otra a la red REGAM, del Servicio de Cartografía de la Consejería de Obras Públicas ([www.iderm.es/geodesia/index.htm](http://www.iderm.es/geodesia/index.htm)), ambas de la Región de Murcia. Las dos estaciones disponen un acceso libre y gratuito a los datos. Debido a que las dos estaciones se denominan LORC, a partir de ahora la estación de la red Meristemum se nombrará como LRCA.



Figura 2.4.24: Estaciones GPS en las inmediaciones de Lorca. A) Estación permanente LORC de la red REGAM ([www.cartomur.com/geodesia/lorca.htm](http://www.cartomur.com/geodesia/lorca.htm)). B) Estación TERC de la redCuaTeNeo situada en la Sierra de Tercia. C) Estación continua LRCA de la red Meristemum (imágenes cedidas por la Dirección General de Medio Ambiente de la Región de Murcia). Extraída de Echeverría et al. (2012).

Las campañas de toma de datos GPS se realizaron mediante la red GPS

CuaTeNeo (Cuantificación de la Tectónica y Neotectónica en la parte oriental de la Península Ibérica), que fue establecida en 1996 con el fin de cuantificar las deformaciones tectónicas actuales del SE de las Béticas, especialmente en las fallas de Alhama de Murcia, Palomares y Carboneras (Soro et al., 1997).

La red se ha observado en su totalidad en 4 ocasiones: 1997, 2002, 2006 y 2009 (Khazaradze et al., 2008). Dos semanas después del terremoto de Lorca del 2011, se llevó a cabo una campaña de medición extraordinaria. El motivo principal de esta campaña era poder detectar posibles deformaciones co-sísmicas en las estaciones de la red CuaTeNeo.

Los datos de las campañas fueron procesados mediante el software de alta precisión GAMIT/GLOBK (Herring et al. 2010; [www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/](http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/)), desarrollado por el Massachusetts Institute of Technology. Los resultados obtenidos son las velocidades horizontales con un límite de confianza del 95% (las elipses de error), respecto a Eurasia (Figura 2.4.23). Estas velocidades representan una fase inter-sísmica de deformación promedio entre los 15 años de registro (1997-2011).

La principal característica del campo de velocidades GPS es la uniformidad del movimiento de las tres estaciones situadas en el lado SE de la FAM (MONT, PURI y GANU) hacia el NNO, aproximadamente en dirección de la convergencia entre Eurasia y Nubia. En cambio, las estaciones situadas en el bloque occidental de la falla (TERC, ESPU y MELL) muestran una velocidad de magnitud inferior, sobre los  $0,5-0,6 \pm 0,3$  mm/a y con un pequeño componente oeste respecto a Eurasia. Es obvio que la Falla de Alhama de Murcia sirve como divisora entre dos regímenes tectónicos diferentes y acumula la mayoría de la deformación observada a través de las medidas de GPS. El movimiento relativo entre las estaciones a los dos lados de la FAM indica una compresión oblicua, donde predomina el movimiento de compresión.

Se analizan los resultados en cuanto a velocidades GPS inter-sísmicas, de forma que el análisis en detalle de las series temporales de las dos únicas estaciones CGPS existentes en la zona, LRCA y LORC, anteriores al terremoto de Lorca, indica un comportamiento altamente anómalo. La estación LRCA mostraba un hundimiento con una tasa de  $95,0 \pm 1,0$  mm/a (Figura 2.4.25 a) y un movimiento horizontal hacia el  $N230^\circ E$  con la velocidad de  $26,0 \pm 0,5$  mm/a respecto Eurasia. La estación LORC, también revela un movimiento anómalo, aunque en menor grado:  $6,7 \pm 0,7$  mm/a hacia  $N121^\circ E$  y con una subsidencia significativamente menor:  $-6,5 \pm 0,1$  mm/a (Figura 2.4.25 b).

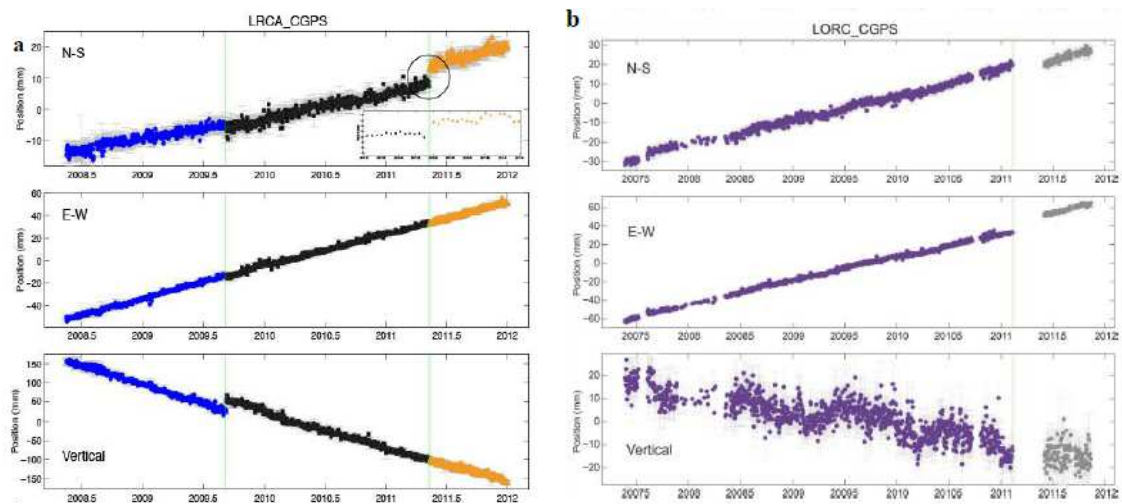


Figura 2.4.25: Figura : Series temporales de la estación CGPS LRCA (a) y LORC (b) en el sistema de referencia de ITRF2008. a) La primera línea vertical verde (09/09/2009) corresponde a un cambio en la antena y la segunda al terremoto de Lorca del 11/05/2011. En la componente N-S, donde se detecta el salto co-sísmico, se ha incluido una ampliación de la serie temporal. a) El periodo de ausencia de datos coincide con el terremoto de Lorca de 2011. Extraída de Echeverría et al. (2012).

En principio se pensó que estos movimientos anómalos correspondían a una inestabilidad del terreno, del edificio o del monumento geodésico donde se localizaban las estaciones, pero el hecho que las dos estaciones indican un movimiento anómalo hace pensar en una causa más general. Los estudios recientes de la deformación cortical mediante la utilización de datos InSAR han proporcionado una posible explicación de los movimientos anómalos en las

estaciones CGPS alrededor de Lorca: es probable que estén afectadas por la subsidencia relacionada con la extracción de agua del acuífero en el valle del Guadalentín (Frontera et al., 2012; González y Fernández, 2011), un fenómeno de escala regional.

En cuanto a las tasas de deformación, se procede al estudio de los desplazamientos co-sísmicos y su modelización, de forma que los valores de deformación presentados en la Figura 2.4.26 indican claramente la actividad tectónica continua de la región y de la FAM en particular. Por ejemplo, en los Pirineos, las tasas de deformación calculadas a partir de mediciones de GPS indican la extensión de un orden de magnitud inferior:  $2,5 \pm 0,5$  nstrain/yr (Asensio et al., 2012).

Subárea	$\dot{\epsilon}_1$ (nstrain) (extensión)	$\dot{\epsilon}_1$ acimut (NºE)	$\dot{\epsilon}_2$ (nstrain) (compresión)	$\dot{\epsilon}_2$ acimut (NºE)
1	$+26.9 \pm 4.9$	$77 \pm 3$	$-78.3 \pm 8.3$	$167 \pm 3$
2	$+45.5 \pm 7.8$	$82 \pm 3$	$-77.3 \pm 8.3$	$172 \pm 3$
3	$+5.0 \pm 8.9$	$69 \pm 4$	$-88.0 \pm 9.3$	$159 \pm 4$

Figura 2.4.26: Ejes principales de deformación (máximo  $\dot{\epsilon}_1$  y mínimo  $\dot{\epsilon}_2$ ) estimados a partir de las velocidades GPS de las estaciones TERC, MELL, PURI y GANU (Figura 2.4.23). El signo negativo significa compresión. Extraída de Echeverría et al. (2012).

El trabajo concluye que mediante el análisis de cinco campañas GPS de la red CuaTeNeo, realizadas entre 1997 y 2011, se ha observado la cinemática inversa y sinistral del sector de Lorca-Totana de la Falla de Alhama de Murcia, la cual coincide con la cinemática obtenida mediante el mecanismo focal del terremoto de Lorca (López-Comino et al., 2012) y el análisis de datos neo-tectónicos (Martínez-Díaz, 2002).

Las estaciones del bloque sur-oriental de la falla muestran unas velocidades con orientación NNO, aproximadamente paralela a la convergencia entre las placas Eurasiática y Nubia. Esta convergencia es la principal causante de la deformación

en la zona, absorbiéndose una tercera parte en el margen sur-oriental de las Béticas. Las estaciones situadas en el bloque noroccidental de la falla, presentan unas velocidades de magnitud muy inferior y orientadas hacia el oeste.

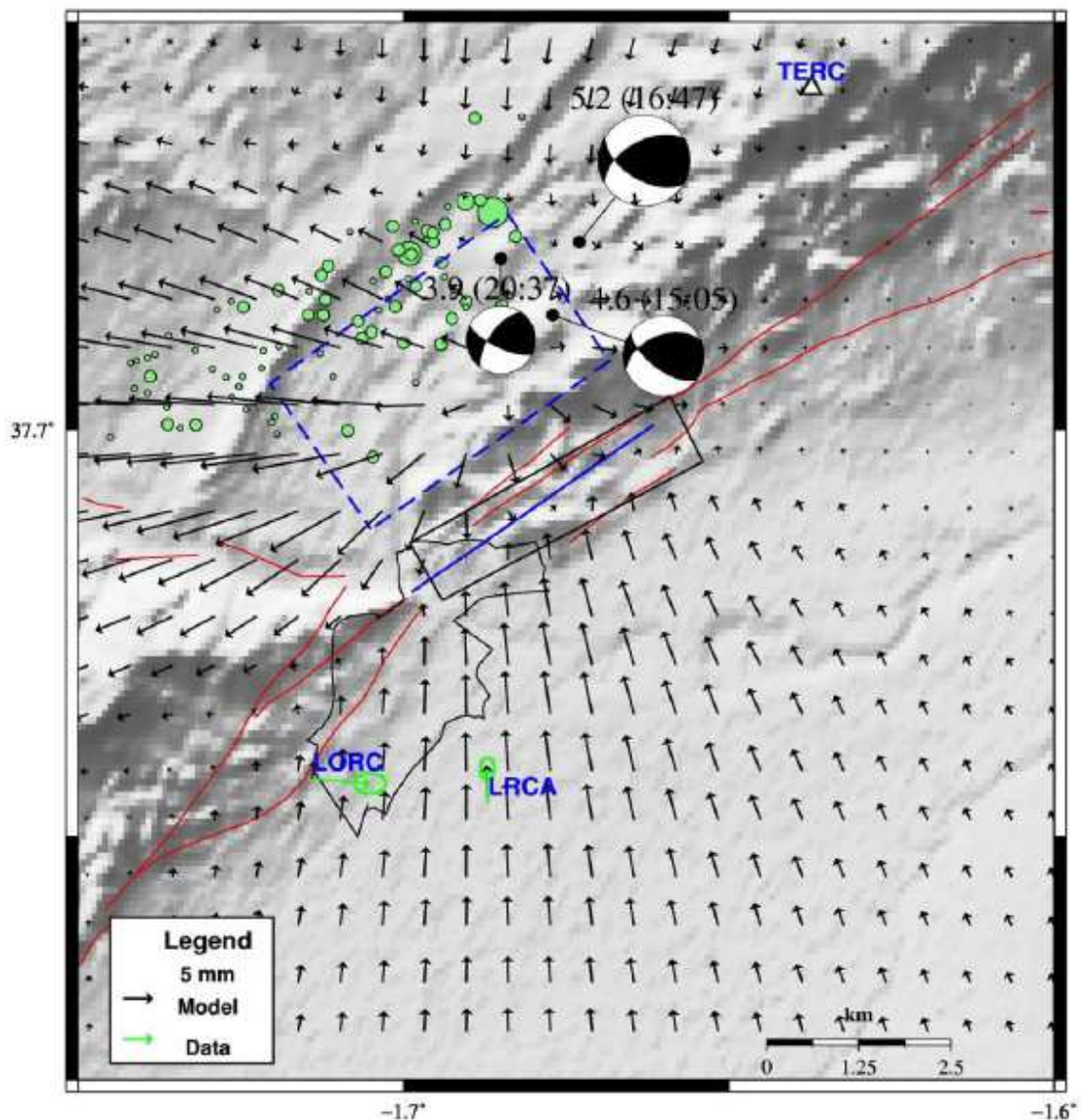


Figura 2.4.27: Modelo de los desplazamientos co-sísmicos horizontales. La falla usada en el modelo está representada mediante un rectángulo en línea discontinua y su proyección en la superficie como una línea continua azul. Los tres mecanismos focales corresponden a los tres terremotos más importantes de la serie sísmica (el principal, Mw 5.2, un precursor de Mw 4.6 y una réplica de Mw 3.9), tomados de López-Comino et al., (2012). Los vectores representan los desplazamientos co-sísmicos observados en las estaciones CGPS LORC y LRCA. Se puede observar la ausencia de deformación para la estación TERC de la red CuaTeNeo. Extraída de Echeverría et al. (2012).

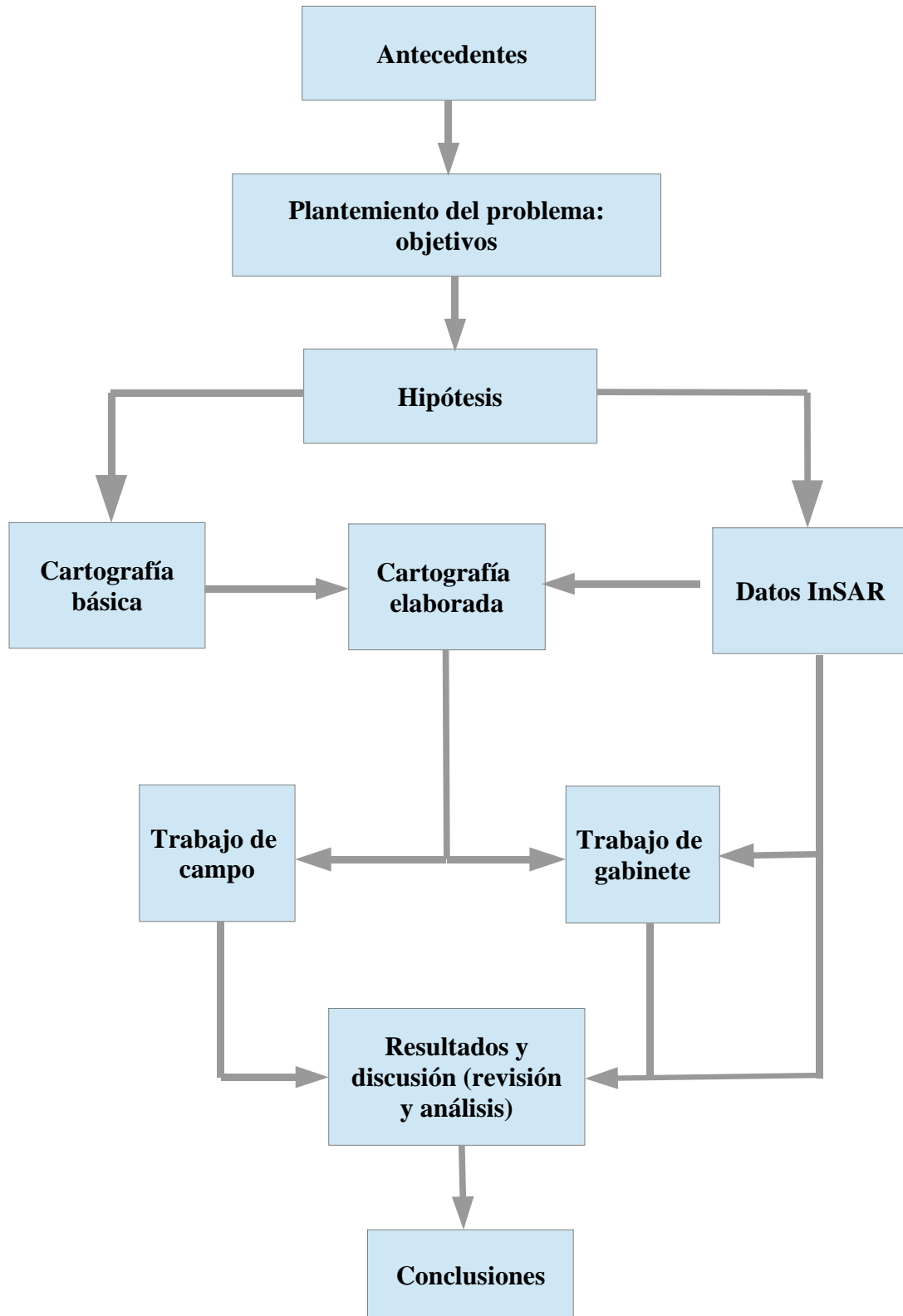
Las estaciones GPS de la red CuaTeNeo no han registrado ningún tipo de deformación co-sísmica relacionada con el terremoto de Lorca. El análisis detallado de la estación continua LRCA, muestra un salto de  $6\pm 0,6$  mm hacia el norte. El modelo de dislocación elástica, construido utilizando los parámetros de la falla y del terremoto proporcionados en recientes publicaciones de López-Comino (2012) y de Martínez-Díaz (2012) predicen un movimiento co-sísmico en la misma localidad muy similar al observado( Figura 2.4.27).

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Diagrama de flujo



### **3.2. Desarrollo de la metodología**

Para conseguir los objetivos explicados en el apartado 1.1, se han seguido los siguientes pasos.

Se ha realizado una exhaustiva búsqueda bibliográfica, para conocer el estado del arte y la máxima cantidad de datos posibles, recabados de la Confederación Hidrográfica del Segura, la Comunidad de Regantes de Lorca y de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, sobre los aspectos que afectan al fenómeno de la subsidencia, con el fin tanto de realizar una descripción detallada del Valle del Guadalentín, como de determinar las causas de la subsidencia en la zona.

Por otra parte se han compaginado los trabajos de gabinete y de campo.

#### **TRABAJO DE GABINETE**

El trabajo de gabinete ha consistido principalmente en:

- Tratamiento de los datos InSAR con SURFER 8.
- Elaboración de cartografía a partir de la cartografía básica de la zona, ampliada con los datos de subsidencia InSAR. Para la localización de las coordenadas UTM se ha utilizado el sistema de proyección ETRS89 UTM30 a través de SITMURCIA. La cartografía se ha procesado con Autocad 2015 Versión Estudiante.
- Estudio y análisis de las variaciones de cota piezométrica en el acuífero del Alto Guadalentín. Para ello se han contrastado los datos de evolución de acuíferos facilitados por la Confederación Hidrográfica del Segura, de la masa de agua subterránea del Valle del Guadalentín, que incluye los acuíferos del Alto Guadalentín y Bajo Guadalentín. Se han comprobado los datos concretos del

acuífero del Alto Guadalentín (código 070.057), a través de 9 sondeos que han servido para controlar las variaciones de los niveles de cota piezométrica desde principios de los años 70 del siglo pasado.

## **TRABAJO DE CAMPO**

A continuación se detalla la metodología seguida para la localización e identificación de casos concretos de consecuencias físicas de los principales signos de subsidencia: patologías en edificaciones, como grietas, giros, etc.; incidencias en el terreno, como grietas y cambios de pendiente; terreno, incidencias en los canales de riego, tales como asientos, giros e inversión de la pendiente; e incidencias en la inundabilidad de la zona.

Al tratarse del objetivo principal del trabajo, es el que ha requerido la mayor parte del esfuerzo y dedicación, especialmente en los que se refiere a trabajo de campo.

Para una primera aproximación y elección de las zonas de búsqueda, se han utilizado dos mapas de subsidencia el primero, elaborado por González y Fernández en 2012 mediante técnicas InSAR (Figura 3.2.1), que muestra las curvas de nivel con la tasa de hundimiento anual cada 2 cm para el periodo 1992-2012, y el segundo el elaborado por Roberta Boni (Figura 3.2.2) en el que se muestran los valores de subsidencia total para el periodo 1992-2012.

Ambos planos fueron elaborados usando los datos recopilados por interferometría radar, en diversas campañas por los satélites ERS-ENVISAT (1992-2007), ALOS PALSAR (2007-2010) y COSMO-SkyMed (2011-2012).

Una vez elegidas las áreas se ha procedido a la inspección ocular de las mismas y a la consulta con los vecinos y agricultores de la zona, técnicos municipales, técnicos de la Comunidad Autónoma, del IGME y de la Comunidad de Regantes

de Lorca, cuyos testimonios han sido de muchísima utilidad, hasta el punto que sin ellos habría sido imposible la localización de la gran mayoría de las incidencias y patologías detectadas.

El hecho de que el autor de este trabajo sea originario de la ciudad de Lorca también ha sido de gran ayuda, al conocer personalmente tanto la zona como a gran parte de las personas a las que se les ha consultado. Esto ha supuesto, sin duda, una gran ventaja en la investigación.

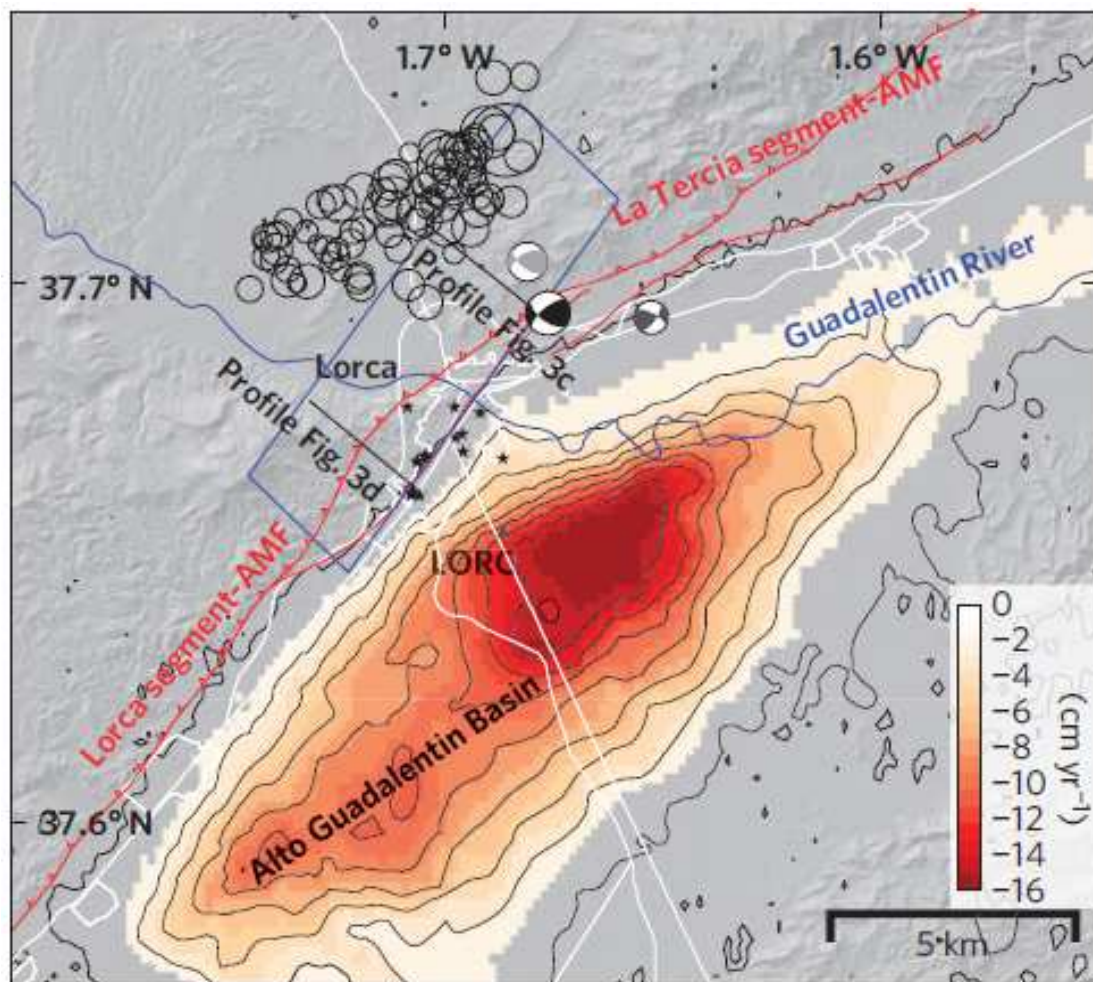


Figura 3.2.1: La ciudad de Lorca y la Cuenca del Guadalentín Alto. IGN sismo principal mecanismos focales (negro), pre-shock (gris claro) y el mayor réplica (gris oscuro), y la secuencia sísmica reubicados. Las estrellas negras son lugares de daño; las líneas rojas son las fallas. Las curvas de nivel indican 2 cm año-1 InSAR hundimientos debido al bombeo de agua subterránea. Azul rectángulo: proyección de la superficie de falla. AMF, Alhama de Murcia Falla. Extraída de González y Fernández (2012).

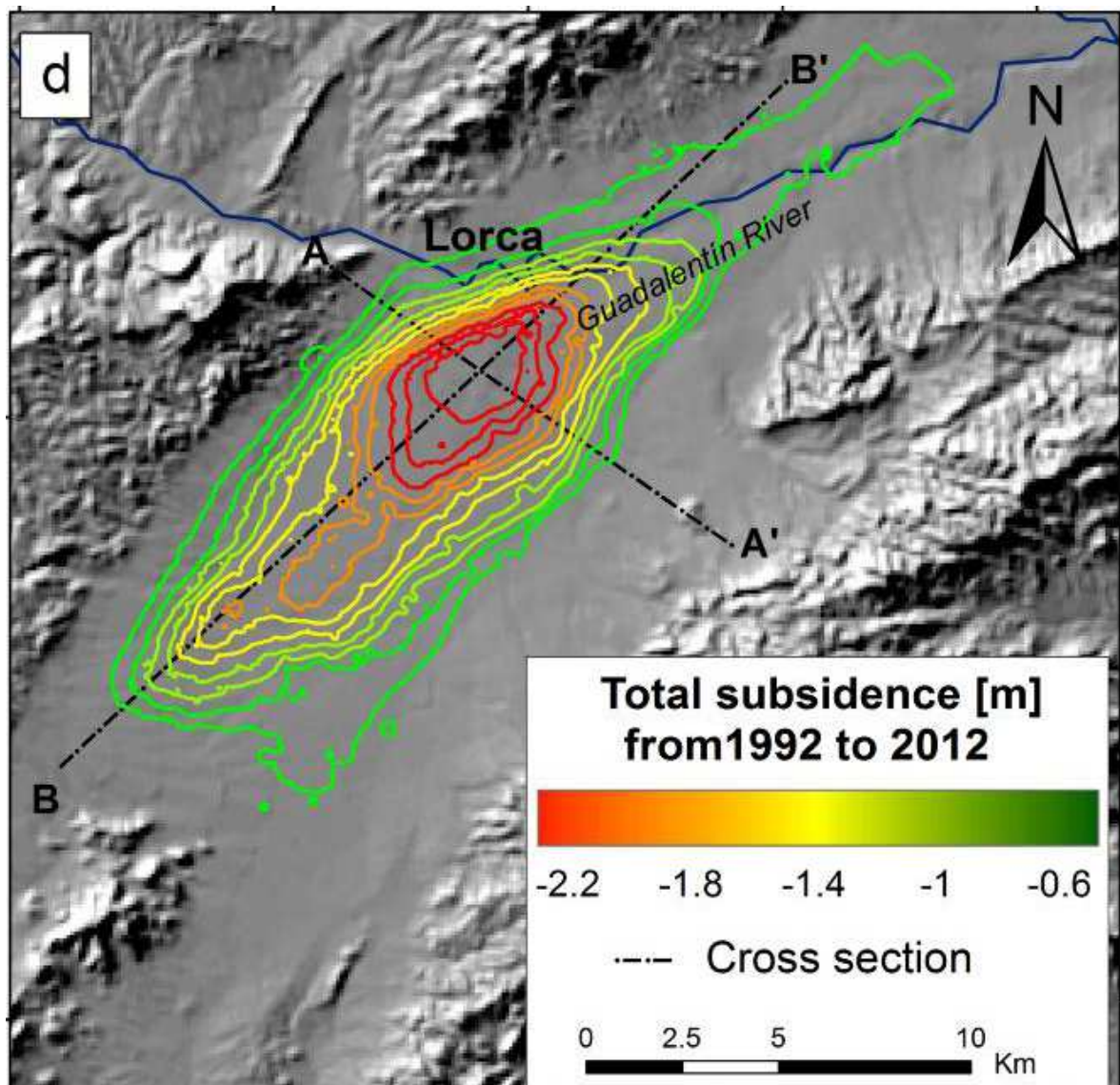


Figura 3.2.2: Valores totales de subsidencia para el periodo 1992-2012. Extraída de Boni (2015, en revisión).

Posteriormente, para localizar con exactitud las incidencias se ha procedido a utilizar la cartografía elaborada a través de la cartografía básica con los datos InSAR a fin de correlacionar las áreas y zonas concretas afectadas por subsidencia con los mencionados datos InSAR.

Todo ello con ayuda del visualizador del Sistema de Información Territorial de la Región de Murcia (SITMURCIA), cuyo enlace web se muestra a continuación:

<http://www.sitmurcia.es/visor/?config=ordenaciondelterritorio.xml>

Teniendo en cuenta las primeras inspecciones oculares y testimonios, y a la vista de las incidencias y patologías detectadas, que podían deberse a la subsidencia, se tomó la decisión de investigar, localizar y analizar los siguientes tipos de incidencias y/o patologías, que se han ubicado en la cartografía con su código y numeración correspondiente, según las siguientes cuatro categorías:

- Patologías en construcciones (PC-nº)
- Incidencias en canales de riego (IC-nº)
- Incidencias en el terreno (hundimientos, grietas, etc.) (IT-nº)
- Zonas inundables afectadas por subsidencia (ZI-nº)

Para cada una de las incidencias o patologías se ha realizado una ficha de datos básicos con la siguiente información: categoría, descripción, identificación, y coordenadas (Figura 3.2.3). También se han elaborado una ficha resumen de cada una de las incidencias y/o patologías, que se pueden consultar en el ANEXO DE FICHAS RESUMEN.

Para las incidencias o patologías de carácter lineal o superficial se ha procedido a realizar los correspondientes levantamientos topográficos y/o altimétricos, con estación total LEICA TC 600.

<b>CATEGORÍA</b>		
<b>DESCRIPCIÓN</b>		
<b>IDENTIFICACIÓN</b>		
<b>LOCALIZACIÓN</b>		
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y

Figura 3.2.3: Modelo de ficha de datos básicos de incidencia o patología.



Se han realizado, además, las siguientes actividades como trabajo de campo:

- Varias visitas de campo con toma de datos: fotografías, mediciones, levantamientos topográficos, declaraciones de vecinos, etc.
- Consulta a técnicos del Excmo. Ayuntamiento de Lorca.
- Consulta a técnicos de la Confederación Hidrográfica del Segura.
- Consulta a técnicos de la Comunidad de Regantes de Lorca.
- Consulta a técnicos de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Inspección de canales de riego guiada por el jefe de obras de la Comunidad de Regantes de Lorca.
- Consulta a vecinos de las pedanías de: Tercia, Cazalla, Pulgara, Campillo, Purias, La Hoya, Marchena, Aguaderas, Tiata, Aguaderas y la Torrecilla.
- Visita y toma de datos en las zonas con mayor cota de agua estancada en la riada del 28 de septiembre de 2012.
- Levantamiento topográficos y/o altimétricos de las incidencias de carácter lineal o superficial.

A continuación se explican con más detalle las acciones concretas realizadas.

- Búsqueda, identificación y análisis de las patologías localizadas en construcciones (PC).

Se han omitido en este apartado las patologías encontradas en almacenes agrícolas y cebaderos contruidos, con anterioridad a 1990, con fábrica de bloque, ya que normalmente las grietas que presentan estas construcciones están asociadas a asientos diferenciales por fallos en el diseño y ejecución de las cimentaciones, debido a que, en la mayoría de los casos, se construían sin licencia ni proyecto.

Se consideró oportuno realizar una inspección ocular por los principales caminos



de de las pedanías de Campillo, Cazalla, Tiata, Pulgara, y Purias y Aguaderas, ya que estaban situadas en las zona de subsidencia, en las que se alternan subzonas con distinto rango de distorsión angular, que si bien es baja en toda la zona afectada, varía entre 0 y el 0,0039.

Se detectaron algunos casos que podían estar relacionados con subsidencia en Cazalla y Pulgara, que se analizan en el capítulo de resultados.

También se tuvo conocimiento, a través de técnicos del IGME, que se habían detectado algunos problemas en las obras de paso de la RM-11 que une Lorca y Águilas (conocida como Autovía Lorca-Águilas), por lo que se sometieron a inspección y toma de datos.

La RM-11 o Vía rápida Lorca-Águilas (antigua C-3211), también conocida como Autovía Lorca-Águilas, es una carretera autonómica perteneciente a la Región de Murcia. Está en servicio desde la década de 1990 como una vía de alta capacidad, desdoblando la antigua carretera, y debido al gran incremento de tráfico en los últimos años, la vía se está actualmente remodelando de forma que todo su recorrido será convertido en autovía. Inicia su recorrido en Lorca y pone fin en la población costera de Águilas.

En su recorrido atraviesa en dirección NO-SE la zona la cuenca del Alto Guadalentín, y por lo tanto la zona afectada por la subsidencia detectada entre los años 1992 y 2012 mediante tecnología InSAR, de forma sensiblemente perpendicular a las isolíneas de subsidencia

A través de técnicos del IGME se tuvo conocimiento de "problemas" detectados en las estructuras de paso de la vía, por lo que se procedió a realizar una inspección ocular y toma de datos de los mismos.

En el caso de patologías de construcciones que suponen un giro o

desplazamiento relativo de las estructuras, se ha comparado la distorsión angular observada con los límites establecidos en el CTE (Figura 3.2.4).

**Tabla 2.2. Valores límite basados en la distorsión angular**

<b>Tipo de estructura</b>	<b>Límite</b>
Estructuras isostáticas y muros de contención	1/300
Estructuras reticuladas con tabiquería de separación	1/500
Estructuras de paneles prefabricados	1/700
Muros de carga sin armar con flexión cóncava hacia arriba	1/1000
Muros de carga sin armar con flexión cóncava hacia abajo	1/2000

**Tabla 2.3. Valores límite basados en la distorsión horizontal**

<b>Tipo de estructura</b>	<b>Límite</b>
Muros de carga	1/2000

Figura 3.2.4: Valores de distorsiones máximas admisibles según el CTE. Fuente: CTE.

- Búsqueda, identificación y análisis de incidencias en canales de riego (IC).

Para la búsqueda de estas incidencias se procedió realizar una inspección ocular de los riegos contiguos a los caminos principales de las pedanías de regadío, así como a preguntar directamente a los técnicos de la Comunidad de Regantes de Lorca y a agricultores conocidos, que dieron información valiosa sobre posibles casos en la pedanía de Campillo, que fueron sometidos inspección, toma de datos y estudio, incluso levantamiento topográfico para comprobar pendientes.

También se comprobaron unas anomalías detectadas de forma casual en el canal del Trasvase Tajo-Segura.

- Búsqueda, identificación y análisis de incidencias en el terreno (IT).

En este caso se ha procedido de dos formas, por una parte se ha recurrido directamente a consultar de forma masiva a personas conocidas, lo que sirvió

para detectar anomalías de cambio de pendiente en terrenos y parcelas, y por otra se ha procedido a recoger y analizar información de Internet sobre grietas en el terreno en los límites de la cuenca del Guadalentín, así como consultar a los vecinos de las zonas donde se habían detectado las grietas.

- Búsqueda, identificación y análisis de zonas de inundabilidad (ZI).

En este caso se comenzó por inspeccionar la zona de la pedanía de Campillo que más sufrió los efectos de la última riada importante ocurrida en la cuenca, la del 28 de septiembre de 2012, y al mismo tiempo consultar con los vecinos, agricultores y técnicos de la Comunidad de Regantes de Lorca.

## **CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL VALLE DEL GUADALENTÍN**

## 4. DESCRIPCIÓN DEL VALLE DEL GUADALENTÍN

### 4.1. Localización y características socioeconómicas

#### 4.1.1. Localización

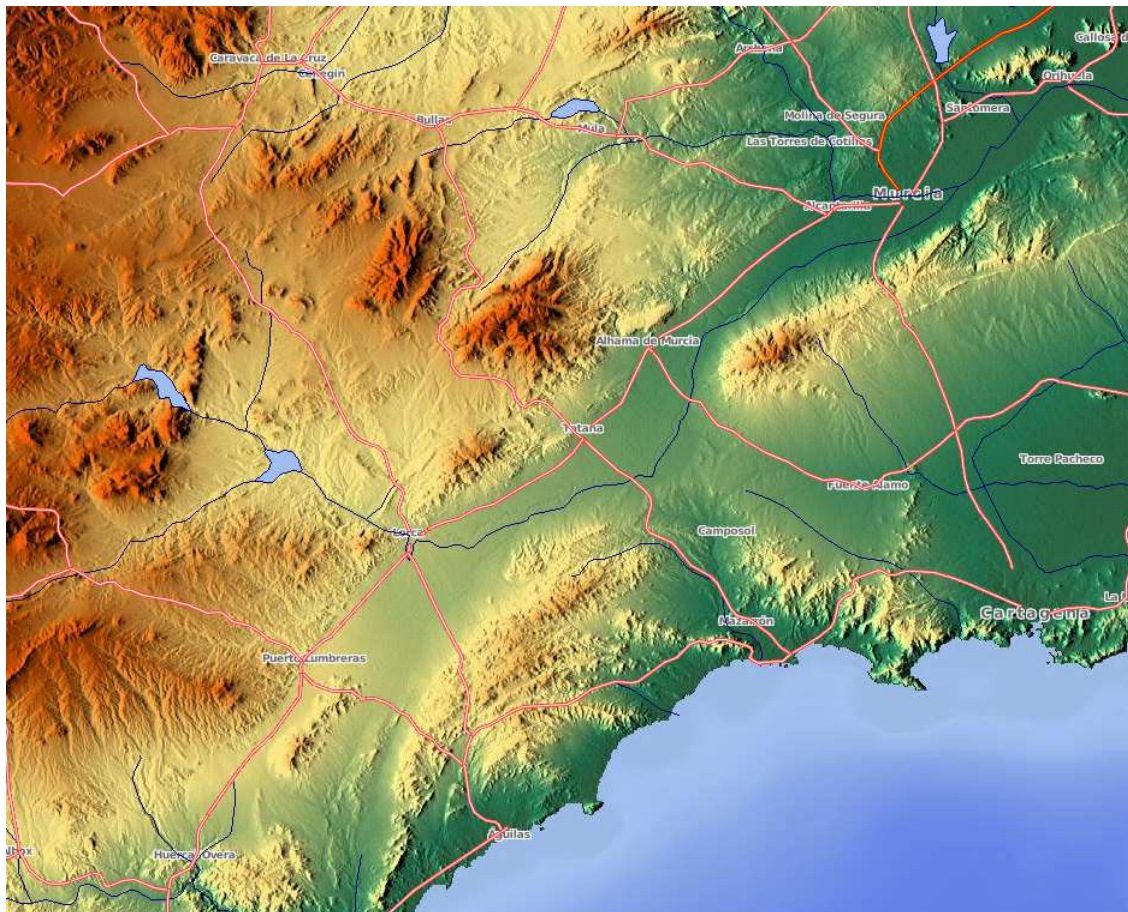


Figura 4.1.1: Representación de la cuenca de la depresión prelitoral murciana. Fuente: Hans Braxmeie.

El Valle del Guadalentín, también denominado depresión pre-litoral murciana, se encuentra situado en el sureste de la península ibérica, en la Región de Murcia. El valle está recorrido por el río Guadalentín y sus afluentes, drenando las aguas superficiales hasta su confluencia con el río Segura (Figura 4.1.1).

#### **4.1.2. Organización administrativa y demografía**

Administrativamente, el Valle del Guadalentín se divide en dos comarcas: Comarca de Lorca (Lorca, Águilas y Puerto Lumbreras) y Comarca del Bajo Guadalentín (Totana, Aledo, Alhama del Murcia, Librilla y Mazarrón).

La cuenca del Alto Guadalentín, objeto de este trabajo, se encuentra localizada, en su mayor parte, en la Comarca de Lorca.

Con objeto de acometer la territorialización del Plan Estratégico de la Región de Murcia 2007-2013, la Consejería de Economía, Empresa e Innovación realizó un análisis socio económico de cada uno de los territorios considerados, agrupados bajo la denominación de territorio de "Lorca-Guadalentín". A continuación se muestran algunos resultados de dicho análisis.

La zona de Lorca-Guadalentín estaba habitada por un total de 164672 personas, en 2006, distribuidos sobre 2410 km<sup>2</sup>. Los municipios de la comarca representan el 21% del territorio regional y el 12% de la población regional, lo que indica una menor densidad de población, con un valor de casi la mitad de la media regional (68 hab/km<sup>2</sup> frente a 121 hab/ km<sup>2</sup> en la Región en 2006). Existen, además, situaciones diferenciadas según el municipio de que se trate. Mientras Aledo tiene una de las densidades de habitantes por km<sup>2</sup> más bajos de la Región, Totana y Puerto Lumbreras tienen valores relativamente similares en tanto que Lorca, el municipio más extenso de la Región, tiene una baja densidad de población (54 hab/km<sup>2</sup>). Tan solo Águilas supera la densidad media regional, situándose en 129 hab/km<sup>2</sup> (Figura 4.1.2). Si bien la tendencia es al alza en los últimos años en todos los municipios de la comarca de Lorca, como se muestra en los siguientes datos del INE en 2014:

- Lorca: 91759 habitantes.
- Águilas: 34632 habitantes.
- Puerto Lumbreras: 14610 habitantes.

Habitantes; Habitantes/Km2

	Lorca - TOTAL	
	Población	Densidad de población
1993	68.545	40,9
1994	69.355	41,4
1995	69.651	41,6
1996	69.045	41,2
1998	69.930	41,7
1999	70.689	42,2
2000	72.000	43,0
2001	77.075	46,0
2002	79.481	47,4
2003	82.511	49,3
2004	84.245	50,3
2005	87.153	52,0
2006	89.936	53,7
2007	89.606	53,5
2008	90.924	54,3
2009	91.906	54,9
2010	92.694	55,3
2011	92.869	55,4
2012	92.865	55,4
2013	92.718	55,3
2014	91.759	54,8

Figura 4.1.2: Evolución de la población y la densidad de población según el Padrón Municipal de Habitantes por km<sup>2</sup> en Lorca . Fuente: INE Padrón Municipal de Habitantes.

Demográficamente, el hecho más relevante es el intenso crecimiento poblacional que se viene produciendo año tras año. En concreto y tomando como referencia la situación en 1998, la población de la zona se incrementa un 27,7%, cinco puntos más que el conjunto regional. Un crecimiento que traducido a tasas medias anuales se concreta en que la zona ha crecido, en promedio, medio punto anual más que la Región.

Destaca en este sentido la concentración del crecimiento en Totana y Lorca, superando ambas la media de la zona, en tanto que Águilas se sitúa en la línea de lo ocurrido a nivel regional.

Una consideración de la evolución por subperiodos muestra una ligera caída del crecimiento en los años 2002-2006, en los que las tasas se moderan en relación con lo ocurrido entre 1998 y 2002, al contrario de lo que ocurre a nivel regional. En este contexto se advierten, sin embargo, divergencias de comportamiento.



Toda vez que en tanto que Águilas y Puerto Lumbreras intensifican su crecimiento, Totana la modera significativamente en tanto que el municipio de Lorca ve disminuir ligeramente su tasa media de aumento de la población. No obstante lo indicado, cabe señalar que salvo en el caso de Aledo, todos los municipios componentes de la zona logran superar las tasas medias de crecimiento poblacional que se alcanzan en la Región,

#### **4.1.3. Factores económicos**

Los sectores económicos más importantes de la comarca son los siguientes:

- Agricultura.
- Ganadería.
- Industria.
- Construcción.
- Servicios.

A continuación se resumen las características principales de cada uno de ellos, teniendo en cuenta que todos son sectores cuyo desarrollo implica un incremento dotacional importante de recursos hídricos, lo que resulta de especial relevancia en el estudio que se está realizando en este trabajo fin de máster.

##### **4.1.3.1. Agricultura.**

Desde el punto de vista económico, se trata de una de las comarcas agrarias más potentes del ámbito de la Confederación Hidrográfica del Segura (Figura 4.1.3).

Respecto a la distribución de la tierra podemos comentar que en la zona de Lorca-Guadalentín se encuentra el 21% de la superficie regional y el 18% de las tierras de cultivo. El menor porcentaje en las tierras de cultivo respecto al conjunto de la Región de Murcia se debe a que en la zona se concentra un 26% de los terrenos forestales de toda la región, lo que reduce la superficie cultivable.

Por otra parte, el 46,5% de la superficie de los municipios que forman Lorca-Guadalentín es cultivable, esta cifra también es ligeramente inferior a la media regional, situada en el 53,5%, por el motivo expuesto en el párrafo anterior.

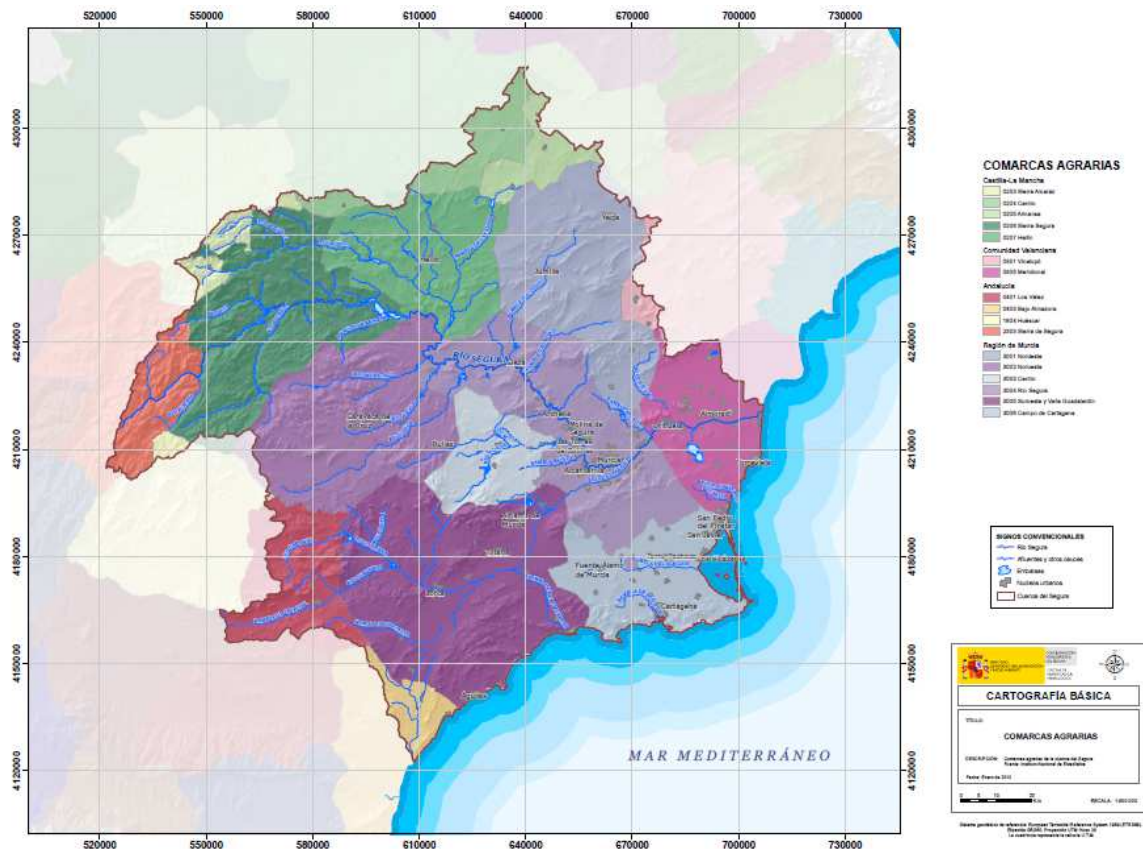


Figura 4.1.3: Comarcas agrarias de la Confederación Hidrográfica del Segura. Fuente: CHS (2015).

Por municipios existen sustanciales diferencias, que van desde el caso del municipio de Puerto Lumbreras con el porcentaje más alto de tierra cultivable y que alcanza el 63,5%, hasta el caso de Águilas con el 34,4%.

La distribución de la tierra de cultivo entre secano y regadío es bastante similar a la media regional, aunque con una mayor proporción de regadío (37,8% frente al 32% regional).

Desde el año 2000 la distribución entre cultivos de secano y de regadío apenas ha variado en el conjunto de Lorca-Guadalentín, experimentándose un ligero incremento del 1,6% en la superficie de regadío (720 hectáreas.) que ha llevado a pasar de un 37,2% de superficie de regadío en 2000 al 37,8% en 2004, suponiendo ello un total de 42360 hectáreas. Este incremento se ha producido en Aledo (240 hectáreas) y en Águilas (480 hectáreas). El resto de los municipios ha mantenido invariable su distribución entre secano y regadío.

En la Figura 4.1.4 se muestra la evolución de las tierras de cultivo en el municipio de Lorca, el más extenso de la comarca entre los años 2000 y 2014.

	<b>TOTAL</b>	<b>Secano</b>	<b>Regadío</b>
<b>2000</b>	77.294	55.115	22.179
<b>2001</b>	77.294	55.115	22.179
<b>2002</b>	77.294	55.115	22.179
<b>2003</b>	77.294	55.115	22.179
<b>2004</b>	77.294	55.224	22.070
<b>2005</b>	77.294	55.115	22.179
<b>2006</b>	72.702	50.523	22.179
<b>2007</b>	72.663	50.523	22.140
<b>2008</b>	72.627	50.935	21.692
<b>2009</b>	72.627	51.788	20.839
<b>2010</b>	72.627	51.788	20.839
<b>2011</b>	72.627	51.788	20.839
<b>2012</b>	72.627	51.788	20.839
<b>2013</b>	71.487	50.648	20.839
<b>2014</b>	71.191	53.161	18.030

Figura 4.1.4: Evolución de las tierras de cultivo en el municipio de Lorca, el más extenso de la comarca entre los años 2000 y 2014. Fuente: Ayuntamiento de Lorca (2015).

Todo esto ha sido posible gracias a la extensa red de regadío, que desde tiempos remotos, se ha ido ampliando y modernizando en la Comarca de Lorca. En la Figura 4.1.5 se muestra el mapa de regadío tradicional de la ciudad de Lorca.

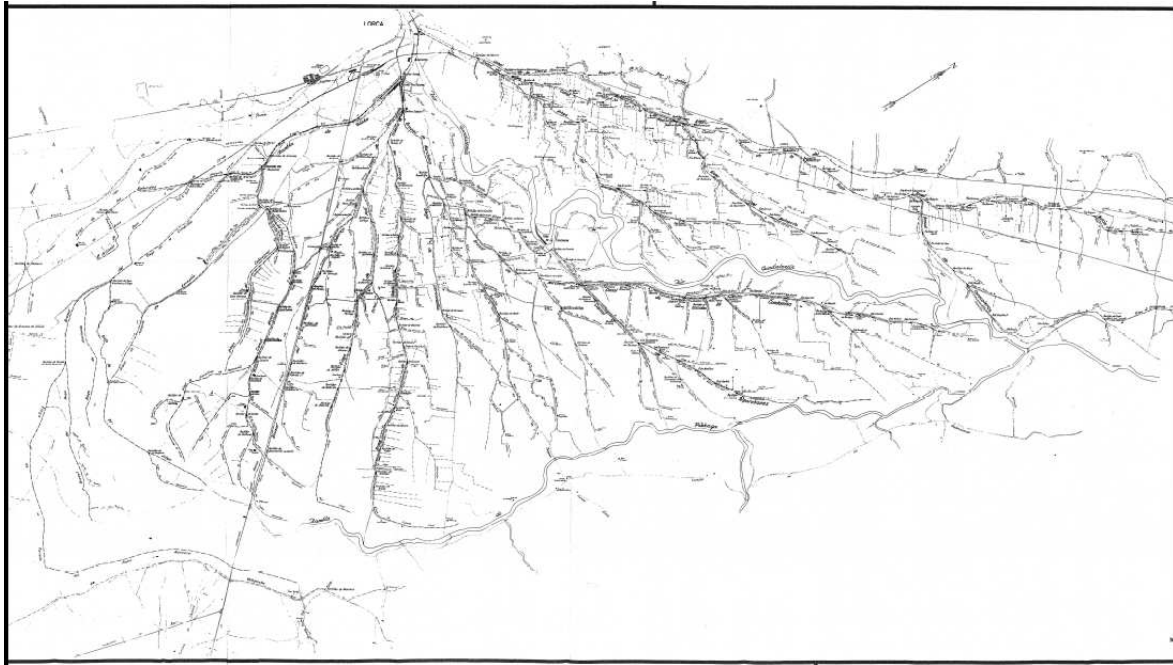


Figura 4.1.5: Mapa del regadío tradicional de la ciudad de Lorca. Fuente: Fuente: Agrupación Cultural Lorquina, cedida por Comunidad de Regantes de Lorca.

#### **4.1.3.2. Ganadería**

Según el Censo Agrario de 1999, en la zona de Lorca-Guadalentín la actividad ganadera analizada era significativamente más importante que en el conjunto de la Región, al contar con 1601 unidades ganaderas por cada 1000 habitantes frente a menos de 1/3 parte del valor medio regional (479). Este volumen de ganadería representa el 38,8% del total de unidades ganaderas de la Región.

La especie más importante en número de cabezas es el porcino, tanto en la Región como en la zona Lorca-Guadalentín, donde representan el 81% de la cabaña ganadera de la zona, algo más que la media regional (74,5%). El ganado bovino, a mucha distancia del porcino, es el segundo más importante con unas 14000 cabezas que aportan el 6,8% de la cabaña de la zona. Este tipo de ganado tiene una importancia similar al conjunto de la Región, donde representa el 6,3%.

#### **4.1.3.3. El sector industrial**

En el año 2004 el número de establecimientos industriales en la zona de Lorca-Guadalentín ascendía a 925, representando el 10,5% de los establecimientos de este sector en la Región. La mayor parte de ellos pertenecen a la industria manufacturera (862), mientras la industria extractiva aporta 19 y 44 la de producción y distribución de energía eléctrica. La industria manufacturera, la más importante de la zona, se caracteriza por un tejido industrial tradicional con una importante industria textil y de la confección, industria del cuero y calzado y también tiene más importancia que en el conjunto de la Región la industria de la alimentación y la Industria de otros productos minerales no metálicos.

Entre los años 2000 y 2004 el número de establecimientos industriales crecieron a un ritmo medio anual del 1,6%, crecimiento inferior al crecimiento medio regional (2,2%). Puerto Lumbreras consigue el mayor crecimiento anual (2,5%), mientras en sentido contrario Aledo ha perdido un establecimiento. En valores absolutos Lorca es el municipio con mayor aumento de establecimientos aunque en términos de crecimiento está por debajo de los datos globales de la zona Lorca-Guadalentín.

En la Figura 4.1.6 se muestra la evolución de la inversión industrial en el municipio de Lorca entre los años 2005 y 2014, diferenciando entre nuevas creaciones industriales y ampliaciones de las industrias ya existentes, y detallando las inversiones en función de que se trate de maquinaria total, terrenos, construcciones e instalaciones, y otras inversiones.

Se pueden apreciar los efectos de la crisis económica entre los años 2009 y 2014, con reducciones en la inversión especialmente en la ampliación de la industria existente en maquinaria, y en los datos globales entre los años 2012 y 2014. Sin embargo durante los años de crisis se observa un incremento de la inversión en terrenos.

Euros

		Inversión industrial - Lorca - TOTAL									
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<b>Total</b>											
<b>TOTAL</b>		6.790.762	1.323.821	7.983.507	7.054.084	18.495.756	47.816.344	13.623.847	44.922.672	5.648.231	25.173.824
<b>Maquinaria Total</b>		3.559.471	775.482	5.851.696	1.857.973	6.943.153	4.483.004	5.848.724	19.817.057	2.023.940	2.245.566
<b>Terrenos, construcciones e instalaciones</b>		3.017.549	480.191	1.177.143	4.077.420	10.415.470	30.262.281	6.028.037	24.890.135	2.957.690	21.900.650
<b>Otras Inversiones</b>		213.742	68.148	954.668	1.118.691	1.137.133	13.071.059	1.747.086	215.480	666.601	1.027.608
<b>Nueva industria</b>											
<b>TOTAL</b>		4.021.117	789.674	1.672.288	3.282.265	16.294.488	47.307.500	10.522.158	39.865.226	2.871.115	24.850.153
<b>Maquinaria Total</b>		1.118.218	296.352	756.715	1.041.782	6.269.617	4.142.440	4.978.387	16.478.948	256.367	4.462.273
<b>Terrenos, construcciones e instalaciones</b>		2.689.157	425.174	621.165	1.559.859	9.001.406	30.092.198	5.006.558	23.283.928	2.031.476	19.724.045
<b>Otras Inversiones</b>		213.742	68.148	294.408	680.624	1.023.465	13.072.862	537.213	102.350	583.272	663.835
<b>Ampliación</b>											
<b>TOTAL</b>		2.769.645	534.147	6.311.219	3.771.819	2.201.268	508.844	3.101.689	5.057.446	2.777.116	323.671
<b>Maquinaria Total</b>		2.441.253	479.130	5.094.981	816.191	673.536	340.564	870.337	3.338.109	1.767.573	-2.216.707
<b>Terrenos, construcciones e instalaciones</b>		328.392	55.017	555.978	2.517.561	1.414.064	170.083	1.021.479	1.606.207	926.214	2.176.605
<b>Otras Inversiones</b>		0	0	660.260	438.067	113.668	-1.803	1.209.873	113.130	83.329	363.773

Figura 4.1.6: Evolución de la inversión industrial en Lorca, en €, según tipo y destino de la inversión. Fuente: Consejería de Industria, Turismo, Empresa e Innovación.

#### 4.1.3.4. Construcción

El subsector de la vivienda en la zona tuvo una fuerte expansión en entre finales de la década de 1990 y 2007. Así, las viviendas terminadas evolucionaron en el trienio 2003-2005, respecto al anterior, con un fuerte ritmo de crecimiento aunque algo más lentamente que en el conjunto de la Región (32,5% frente al 36,3% regional). El crecimiento de las viviendas terminadas se debió a la favorable evolución de las viviendas libres y pese a la caída de las de VPO, tanto en Lorca-Guadalentín como en el conjunto de la Región.

No obstante, el retroceso de las de VPO, en el trienio 2003-2005 respecto al anterior trienio, fue ligeramente más suave en la zona estudiada que en el total regional (-51% frente al -55% regional) mientras las libres experimentaban un espectacular crecimiento mucho más acelerado en la zona de Lorca-Guadalentín (+101% frente al +65% regional).

Este fuerte crecimiento de la vivienda libre y el hecho de representar este tipo de

vivienda casi el 83% del mercado de las viviendas terminadas, provocó, que durante esos años, la ratio de viviendas terminadas totales por cada 1000 experimentara un crecimiento al pasar de 31 viviendas/1000 habitantes en el primer trienio estudiado a 37 viviendas en el segundo trienio. Destacan los casos de Águilas y Totana por su fuerte crecimiento y el de Lorca por ser el único municipio que ha visto reducido esta ratio al experimentar un incremento de población mientras sus viviendas terminadas se reducían en el segundo trienio estudiado 2003-2005.

#### **4.1.3.5. El sector servicios**

Dentro del sector servicios en la Comarca de Lorca podemos destacar la importancia de los siguientes:

- Transporte por carretera.
- Comercio al por menor.
- Comercio al por mayor.
- Sector financiero.
- Turismo y ocio.

Seguidamente se muestra una breve explicación de cada uno de ellos:

#### **Transporte por carretera.**

Entre el año 2000 y el 2005 los vehículos a motor y los camiones y furgonetas crecieron en Lorca-Guadalentín un 27% y 24% respectivamente. Estos fuertes crecimientos han sido ligeramente inferiores a los del conjunto de la Región, que se situaron en el 26% para los vehículos a motor y en el 28% para camiones y furgonetas.

Analizando el número de camiones y furgonetas por cada 1000 habitantes en Lorca-Guadalentín se observa que esta ratio (118 por cada 1.000 habitantes) es



superior a la ratio media regional (104 por cada 1000 habitantes). Dicho indicador muestra la fortaleza del transporte por carretera en esta zona. Resalta por su alta ratio el dato de Puerto Lumbreras con 146 camiones o furgonetas/1000 habitantes en 2005.

### **Comercio al por menor.**

Tomando como base al Directorio de Actividades económicas, se obtiene que el número de establecimientos dedicados al comercio minorista han crecido en el periodo 2000-2004 un 13,3% en la zona de Lorca-Guadalentín, hasta llegar a la cifra de 2511.

La variación porcentual es prácticamente a la del conjunto de la Región, donde dicho número se incrementó en un 13,2% en el mismo período. Por municipios destaca Totana con un crecimiento acumulado entre el año 2000 y el 2004 del 17% y 70 nuevos establecimientos y el caso de Lorca con 156 establecimientos y una variación del 13,3%. Como era de esperar, este tipo de establecimientos se concentran en Lorca donde se sitúan el 52,3% de ellos, siendo Águilas el segundo municipio por importancia.

### **Comercio al por mayor.**

Entre el año 2000 y el 2004 el número de establecimientos de comercio al por mayor creció un 19,9% en la zona de Lorca-Guadalentín, crecimiento superior al regional (17,2%). Esto supuso, en valores absolutos la creación de 141 nuevos establecimientos mayoristas en la zona, de los que más de la mitad pertenecían a Lorca.

El resto, se repartieron entre Águilas, con 29 nuevos establecimientos mayoristas y el mayor crecimiento entre ambos años (29,9%), y Totana con 23 establecimientos y Puerto Lumbreras con 13.

## **Sector financiero.**

El número de oficinas bancarias en la zona alcanzaba, en 2005, la cifra de 138 unidades, lo que suponía el 11,3% del total regional. Número que, además, había crecido desde el año 2000 más rápidamente que en el conjunto de la Región, al experimentar estas un aumento del 16,9% frente al 14,2% regional (20 nuevas oficinas).

Por municipios, Águilas destaca en ese periodo con un aumento en el quinquenio 1990-2005 del 40% en sus oficinas bancarias, (8 nuevas oficinas), seguido de Puerto Lumbreras con un aumento del 20% y de Lorca (15,9% y 11 nuevas oficinas).

Si se considera la densidad de entidades financieras por cada 10000 habitantes, se observa que la ratio en Lorca-Guadalentín (8,6‰) es ligeramente inferior la ratio medio regional (9,1‰), siendo el municipio de Totana el que presenta el menor valor.

## **Turismo y ocio.**

Los datos estadísticos aportados por la Consejería de Turismo sobre viajeros y pernoctaciones se distribuyen por zonas de destino y no por municipios, por lo que para analizar la zona de estudio Lorca-Guadalentín se deben analizar los datos de Lorca y Puerto Lumbreras agregados dentro de lo que se denomina turismo de ciudad, los datos de Águilas dentro del Turismo de Costa y los datos de Totana y Aledo dentro de Turismo de Centro- Sierra Espuña, donde además de estos municipios se presentan agregados los datos de otros seis municipios.

Durante el periodo 2001-2005 hubo un fuerte incremento de la actividad turística en la zona. Dicho incremento traducido tanto en un considerable aumento del número de viajeros a un ritmo medio anual del 10,6%, tasa que casi duplica la

media regional (5,7%), como en el número de pernoctaciones, variable que ha crecido en un fuerte 11,6% en media anual, mientras el turismo regional lo hacía sólo en un 2,0%.

Esto supone el aumento de la importancia del turismo de esta zona, ya que cada año la participación de los viajeros y las pernoctaciones en el total de la Región aumentaba, hasta representar en 2005 el 15,9% de los viajeros totales y el 11,6% de las pernoctaciones.

En los últimos años se ha ido incrementando, lo que ha estado auspiciado por el auge del turismo en la costa de Águilas.

Por tipo de destino, el turismo en la Costa Cálida se ha mantenido, al crecer las pernoctaciones un moderado 0,9% anual, gracias a la excelente evolución en Águilas, ya que Mazarrón y La Manga han perdido importancia a lo largo de los años y han registrado tasas negativas en el número de pernoctaciones. El turismo de Ciudad de Lorca y Puerto Lumbreras representó un crecimiento medio anual entre el año 2001 y 2005 del 1,9%.

## **4.2. Climatología**

La región del Sureste español está considerada como la región más seca de la península ibérica, con un clima que se puede definir como mediterráneo, cálido y seco, caracterizado especialmente por un marcado déficit de humedad.

El clima del área es de tipo mediterráneo subdesértico (Cerón, 1997).

Trapote y Jover (2014) citan a Grindlay y Hernández (2007) y Gil (2002) "La comarca de Lorca se sitúa en la parte suroccidental de la Región de Murcia, en el sureste peninsular, en una zona de penuria hídrica endémica, debido, fundamentalmente, a las características de su régimen pluviométrico, de

precipitaciones escasas e irregulares, generalmente cortas e intensas y, en no pocas ocasiones, torrenciales".

La escasez e irregularidad de las precipitaciones son la causa principal de la aridez que caracteriza la zona, en la que se alternan una acusada sequía estival con una elevada concentración de las lluvias, además de un gran índice de evapotranspiración a lo largo de todas las estaciones.

Como vemos la zona se caracteriza, por las lluvias torrenciales, que ocurren sobre todo en primavera y otoño. Se trata, por tanto de una cuenca de origen fluvial, debido a la alternancia de las sequías e inundaciones, lo que ha condicionado un ciclo sedimentario en el que se favorece la subsidencia del terreno.

La humedad en la capa superficial del suelo es prácticamente nula entre mayo y octubre, y sólo se puede considerar que el suelo posee una una humedad próxima a la de saturación durante segunda mitad de diciembre y el mes de enero. El resto del año el suelo se encuentra en un proceso de desecación-humectación que propicia los cambios de volumen del mismo, y que se hace más acusado en los períodos de abril y finales de septiembre y octubre.

Con el fin de evaluar adecuadamente los recursos hídricos de la Demarcación Hidrográfica del Segura, esta ha recabado la información de precipitaciones, evaporaciones, temperatura, etc. La serie da datos climatológicos comienza en el año hidrológico 1940/41 y se extiende hasta el 2005/06.

Se caracteriza el periodo 1940/41-2005/06, serie histórica, y el periodo 1980/81-2005/06, serie corta. De esta última serie se obtienen los siguientes valores medios:

- Precipitación: 362 mm
- Infiltración: 25,93 mm/año,

- Escorrentía: 40,59 mm/año
- Temperatura: 14 – 17 °C.
- Evapotranspiración: 338,7 mm

En la Figura 4.2.1. se presenta un resumen de los datos climatológicos correspondientes a la estación más cercana a la cuenca del Alto Guadalentín, situada en la base aérea de Alcantarilla para el periodo 1981-2010.

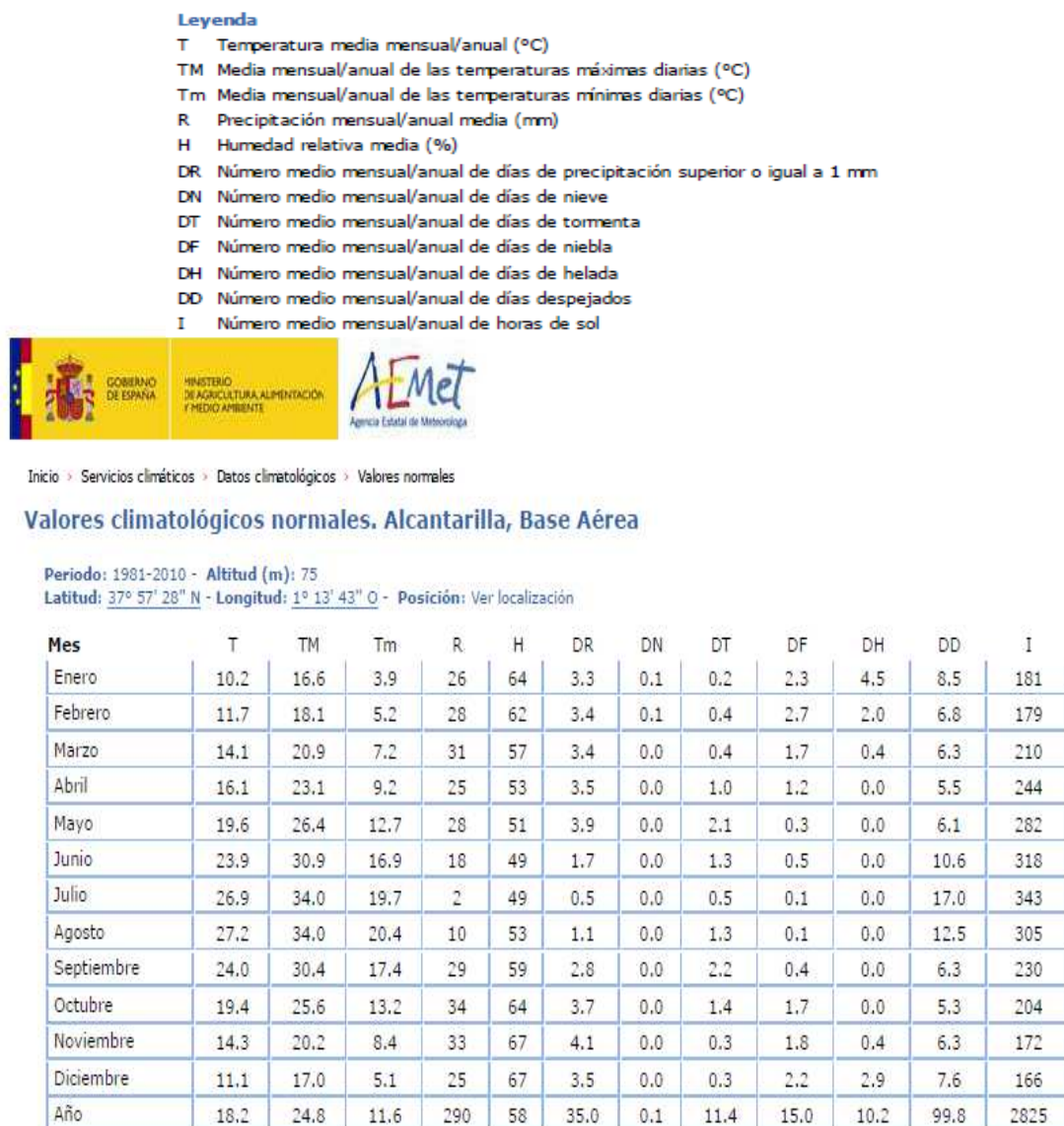


Figura 4.2.1: Resumen de los datos climatológicos correspondientes a la estación más cercana a la cuenca del Alto Guadalentín, situada en la base aérea de Alcantarilla para el periodo 1981-2010. Fuente. AEMET.

También se recogen los valores estadísticos de precipitaciones por zonas hidráulicas para el periodo indicado (serie 1980/81-2005/06), que se recogen en la Figura 4.2.2.

Zona	Media aritmética	Máximo	Mínimo	Desv. Típica	Coef. Variación	Coef. sesgo
<b>DHS</b>	<b>362</b>	<b>1.128</b>	<b>29</b>	<b>138</b>	<b>0,38</b>	<b>1,92</b>
Sierra del Segura	577	1.094	366	165	0,28	0,61
Río Mundo	411	1.128	257	164	0,40	1,83
Noroeste de Murcia	402	742	277	65	0,16	0,96
Mula	349	497	263	39	0,11	0,51
Sur de Alicante	276	383	52	48	0,17	-3,27
Guadalentín	320	507	183	42	0,13	0,34
Ramblas del Noroeste	286	469	171	29	0,10	-0,04
Vega Alta	305	497	205	43	0,14	1,26
Vega Media	292	430	227	40	0,13	1,17
Sur de Murcia	238	429	29	75	0,31	-1,54
Mar Menor	280	483	32	77	0,28	-1,96
Corral Rubio	373	653	190	81	0,22	1,11
Yecla	339	728	240	46	0,13	2,15
Almería	239	372	42	60	0,25	-2,22

Figura 4.2.2: Datos estadísticos de precipitaciones por zonas hidráulicas para el periodo indicado (serie 1980/81-2005/06). Fuente: AEMET.



### **4.3. Hidrología superficial y profunda**

#### **4.3.1. Hidrología superficial**

El Valle del Guadalentín se incluye dentro de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), creada en 1926, o Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS), según el más reciente concepto de "demarcación" fruto de la aplicación de la Directiva Marco del Agua, a efectos de planificación hidrológica, en el que se incluye tanto la superficie de la cuenca del Segura como sus aguas costeras.

Los principales datos, desde el punto de vista hidrológico, según la Memoria 2010 de la CHS, son los siguientes:

- Superficie total de la demarcación: 20234 km<sup>2</sup>
- Superficie total sin contar aguas costeras: 19025 km<sup>2</sup>
- Temperatura media (intervalo de variación): 10-18 °C
- Temperatura máxima: 45 °C
- Pluviometría media: 365 mm
- Evapotranspiración potencial (intervalo de variación): 600-950 mm
- Evapotranspiración potencial media: 827 mm

La totalidad de la cuenca presenta un balance hídrico deficitario, de forma que las demandas superan a los recursos en 460 hm<sup>3</sup> (Memoria 2010 CHS). El Valle del Guadalentín ocupa 2410 km<sup>2</sup>

La cuenca del Alto Guadalentín, forma parte de una de las zonas hidráulicas más relevantes y complejas de la Confederación Hidrográfica del Segura (Figura 4.3.1).

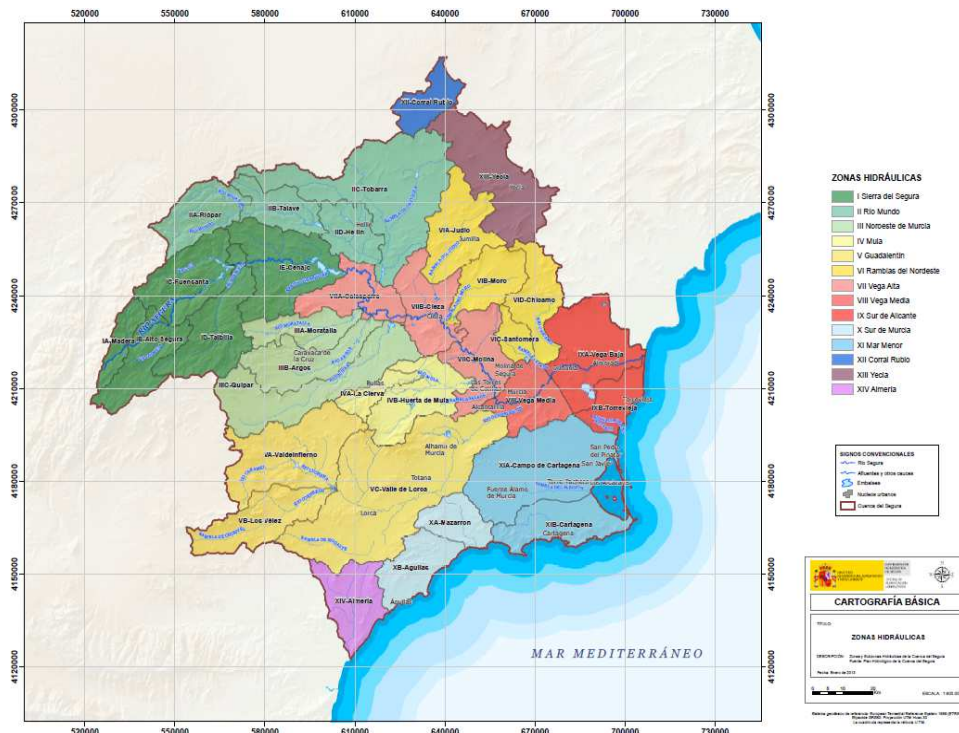


Figura 4.3.1: Zonas hidráulicas de la Confederación Hidrográfica del Segura.  
Fuente: CHS.

Como consecuencia de la climatología descrita en el apartado anterior, la zona se caracteriza por la alternancia de largas épocas de sequía interrumpidas por lluvias torrenciales, hasta el punto que el río Guadalestín, cuyas características naturales por tramos se pueden observar en la Figura 4.3.2, ha llegado a estar considerado como el río más salvaje de Europa. Al menos, así lo calificó el geógrafo francés Maurice Pardé en 1956, aunque posiblemente resulte exagerado definir de esa forma al río Guadalestín.

No obstante se trata, sin duda de uno de los cauces naturales más peligrosos, desde el punto de vista hidráulico, a la vista de todos los documentos que se conservan hasta la fecha, lo que viene a confirmar, además, que el ámbito territorial de la Demarcación Hidrográfica del Segura ha sido una de las zonas más recurrentemente castigadas por avenidas e inundaciones desde que se tiene constancia histórica.



Máster Universitario en Ingeniería de los Materiales, del Agua y del Terreno

La gran mayoría de las inundaciones provocadas por el Guadalentín suelen darse durante los meses de septiembre, octubre, noviembre o abril.

De hecho, una de las últimas avenidas importantes, la de noviembre de 1987, fue el desencadenante para la aprobación por el procedimiento de urgencia y con rango de ley del R.D.L. 4/1987 de 13 de Noviembre, del Plan de Defensa frente a inundaciones en la cuenca del Segura, que incluía los proyectos concretos de obras, con sus plazos previstos de ejecución y los correspondientes compromisos económicos.

Las zonas de la demarcación donde tradicionalmente ha existido mayor riesgo potencial de inundación son las vegas y planicies del río Segura (Vegas Media y Baja) y del Guadalentín, los núcleos de población atravesados por ramblas, como Cartagena o Puerto Lumbreras, aquellos ubicados aguas abajo de presas, como Santomera o Crevillente, y las ramblas costeras sin infraestructuras de laminación.

El río Guadalentín es un claro ejemplo de la alta variabilidad e imprevisibilidad de los caudales registrados en los ríos del sureste español. La persistencia interanual de caudales bajos contrasta con el repentino, aunque estadísticamente periódico, crecimiento de los mismos, dando lugar a grandes avenidas capaces de provocar cuantiosos daños materiales y personales dentro de los límites de la llanura de inundación. Algunos ejemplos de las principales avenidas conocidas en la cuenca del río Guadalentín son:

- Inundación del 15 de octubre de 1879, cuando se produjo la riada de Santa Teresa, en la cabecera del Guadalentín se estima que cayeron  $600 \text{ l/m}^2$  en una hora. Tuvo a su paso por Lorca una punta de  $1.510 \text{ m}^3/\text{s}$  ocasionado 13 muertos.
- Inundación del 19 de octubre de 1973, en la que se produjo la peor crecida del siglo tras unas precipitaciones de más de  $300 \text{ l/m}^2$  en el norte de Almería. La rambla de Nogalte alcanzó un caudal de  $1974 \text{ m}^3/\text{s}$  a su paso por Puerto

Lumbreras, donde se registraron 83 víctimas y 13 en Lorca.

- La última se produjo el 28 de septiembre de 2012, en la que los intensos episodios de lluvias torrenciales registrados en su cuenca vertiente provocaron innumerables daños materiales en los términos de Lorca y Puerto Lumbreras, con pérdida incluso de vidas humanas. En el Pantano de Puentes se llegó a registrar un caudal de entrada de 2000 m<sup>3</sup>/s, aumentando el agua embalsada de 5,1 hm<sup>3</sup> a 18 hm<sup>3</sup> en apenas unas horas. El Guadalentín a su paso por la ciudad de Lorca llegó a los 200 m<sup>3</sup>/s, que es el límite del caudal que puede acoger en este tramo urbano (ver Figura 4.3.3).



Figura 4.3.3: Imagen del cauce del río Guadalentín a su paso por Lorca (bajo puente de ferrocarril) en la riada del 28 de septiembre de 2012. Fuente: Internet



#### 4.3.2. Hidrología subterránea

En cuanto a la hidrología subterránea:

Según datos de la CHS el sistema acuífero del Alto Guadalentín, identificado como 070.057 en la Figura 4.3.4, y como 096 en la Figura 4.3.5 y cuya estructura, composición y morfología se ha revisado en apartados anteriores, por parte de diversos autores, ofrece una disponibilidad de recursos de 11,50 hm<sup>3</sup>/año, según figura en los "Documentos iniciales de la planificación hidrológica 2015-2021"

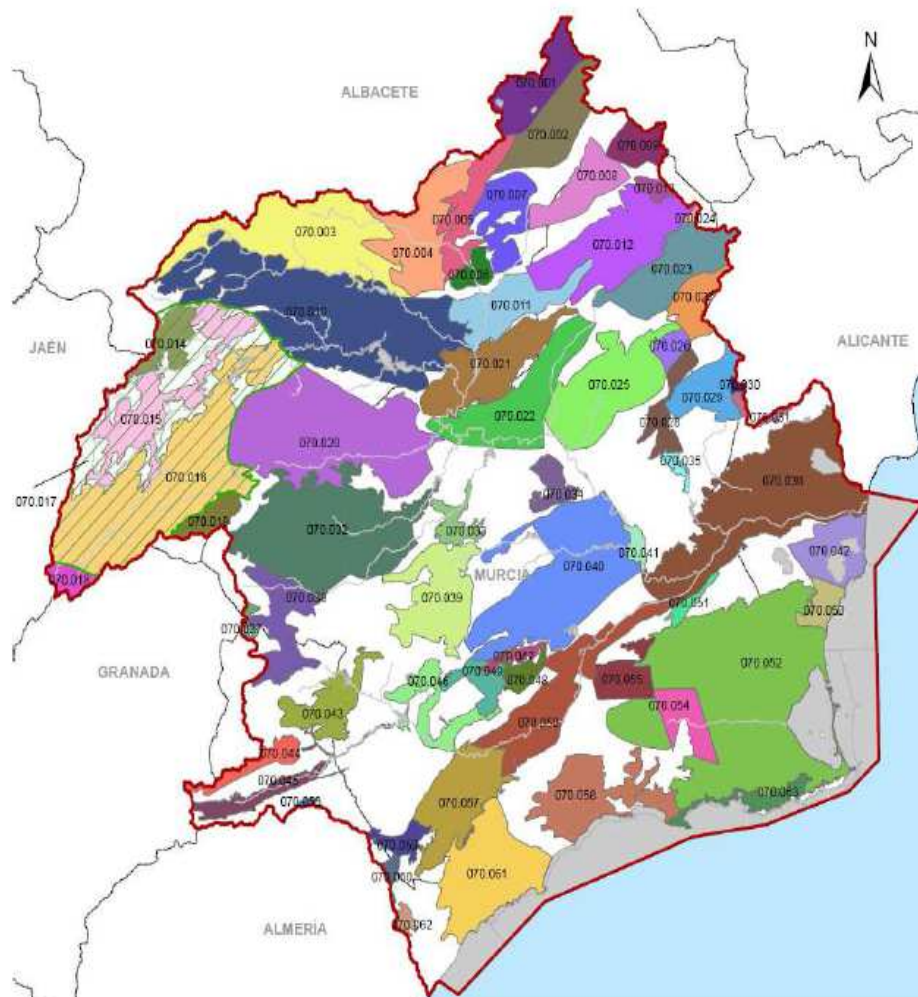


Figura 4.3.4: Delimitación de las masas de agua subterráneas en la Demarcación Hidrográfica del Segura. Fuente: CHS.



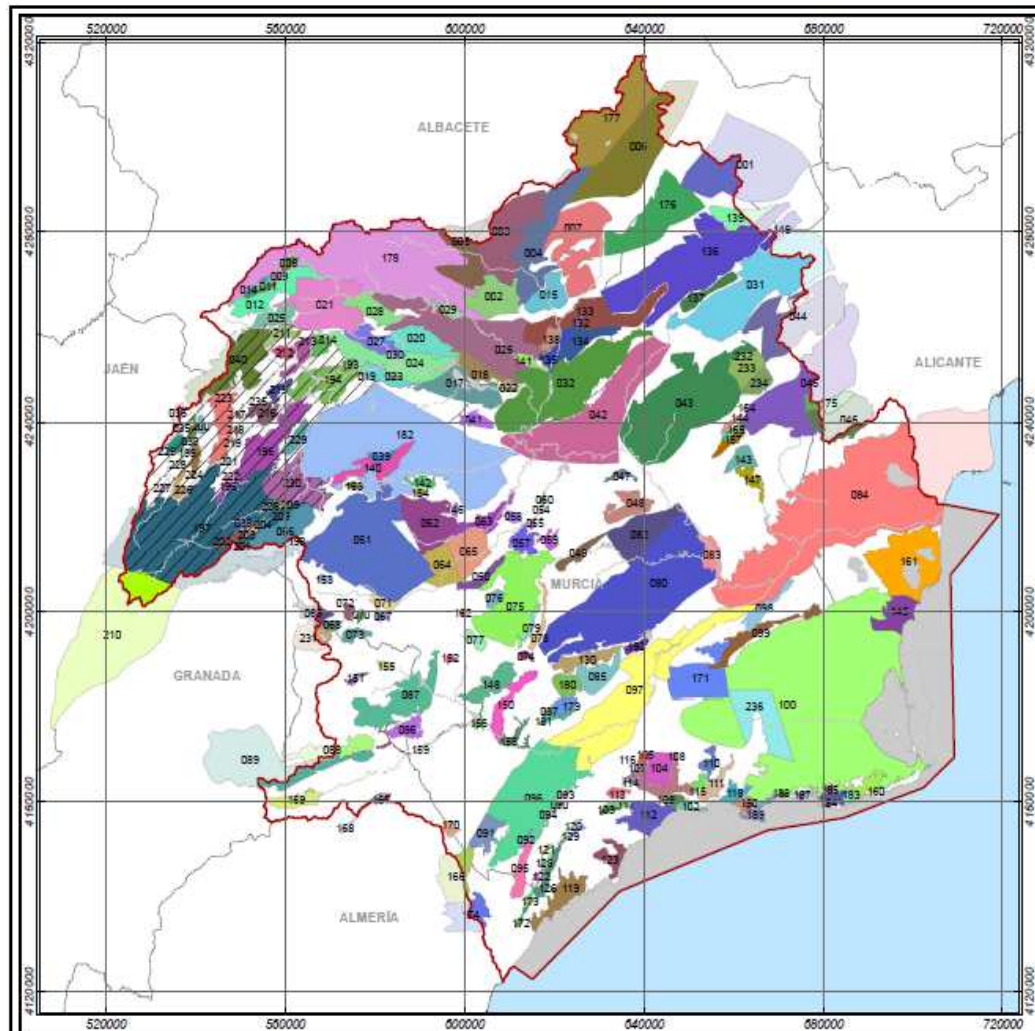


Figura 4.3.5: Delimitación de los acuíferos en la Demarcación Hidrográfica del Segura.  
Fuente: CHS.

Se trata de un acuífero formado por arenas y gravas pliocuaternarias, entre 100 y 300 m de espesor, que en algunas zonas presentan a techo materiales semipermeables, también pliocuaternarios, de 0 a 20 m de espesor. La base impermeable está formada por margas, yesos y conglomerados miocenos o filitas y micaesquistos del Paleozoico. Se sitúa en una depresión intra montañosa de las Cordilleras Béticas, delimitada por fallas laterales que separan estos materiales de las formaciones preorogénicas.

La zona no saturada está compuesta por gravas, arenas y limos del

Pliocuatenario.

En lo que respecta a los límites geográficos y de la masa de agua:

Geográficamente se ubica en la provincia de Murcia, entre las poblaciones de Lorca, al NE, y Puerto Lumbreras, al O. El límite SE se identifica con la Sierra de la Carrasquilla, y al SO limita con Sierra de Enmedio y Sierra de la Torrecilla. El límite septentrional, con el Bajo Guadalentín, se localiza aproximadamente a la altura de la carretera de Lorca-Águilas.

En cuanto a la masa de agua, el límite meridional se localiza en el contacto con los afloramientos miocenos margosos, con los materiales carbonatados triásicos de la Sierra de Enmedio. Al NO el acuífero limita con las filitas permotriásicas del Alpujárride y al SE con las margas del Mioceno y con los micaesquistos del Nevado-filábride. El límite septentrional lo forma el contacto con la formación acuífera multicapa del Bajo Guadalentín.

Actualmente la recarga se produce por infiltración directa de las precipitaciones, infiltración de escorrentía superficial y retorno de riego. No existiendo actualmente descargas directas.

La Confederación Hidrográfica del Segura elabora periódicamente unos informes y unos mapas piezométricos de los acuíferos de la demarcación.

En la Figura 4.3.6, se puede observar el mapa con la localización de puntos de control del acuífero del Alto Guadalentín, de la red piezométrica oficial.

Y en la Figura 4.3.7 se muestra el mapa con el detalle del estado de los sondeos en cuanto al rango de profundidad media del agua en los distintos puntos de control piezométrico del acuífero del Alto Guadalentín, donde se aprecia que en la mayoría de los sondeos del Alto Guadalentín el agua se encuentra a una

profundidad superior a los 150 m, únicamente en dos sondeos la profundidad es menor, uno que marca una profundidad media entre 50 y 100 m, y el otro entre 100 y 150 m.



Figura 4.3.6: Detalle de la localización los sondeos de control piezométrico del acuífero del Alto Guadalentín. Fuente: CHS.

“Inicialmente, el nivel piezométrico del acuífero se encontraba muy próximo a la superficie en incluso existían puntos urgentes. A partir de 1960, y sobre todo en los últimos 20 años, tuvo lugar el desarrollo de una agricultura de invierno que favoreció un aumento de la explotación de agua en la zona, ocasionando la sobreexplotación del acuífero” (Cerón, 1997).

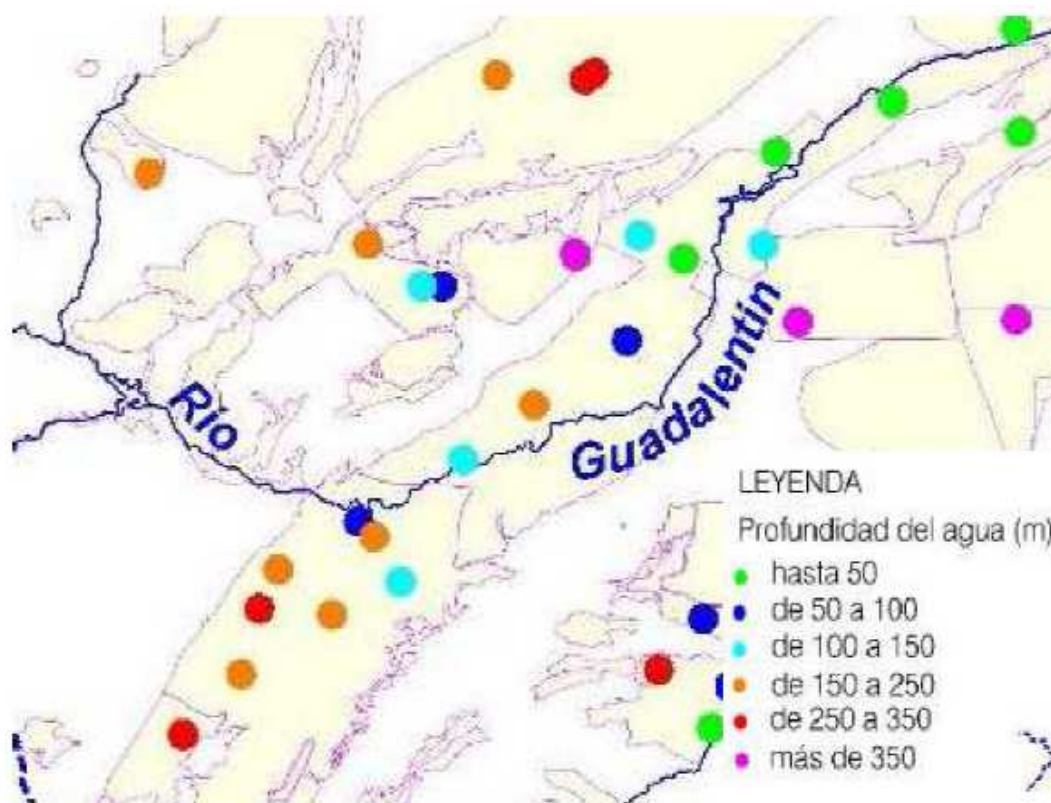


Figura 4.3.7: Detalle de la profundidad media del agua en los sondeos del acuífero del Alto Guadalentín, en marzo de 2015. Fuente: CHS.

Según la memoria de la CHS el descenso medio del nivel piezométrico del acuífero del Alto Guadalentín, desde 1972 hasta la fecha ha sido del orden 118 m (Figura 4.3.8).

MASUB	Acuífero	Núm. sondeos considerados	Fecha primera medida	Descenso desde inicio (m)	Descenso desde último percentil 90 (m)	Percentil última medida
070-057	Alto Guadalentín	9	16/05/1972	118.02	121.54	15.56

Figura 4.3.8: Descenso medio del nivel piezométrico del acuífero del Alto Guadalentín, desde 1972 hasta la fecha. Fuente: CHS (2015).

En las siguientes figuras se representan, por rangos, los descensos piezométricos en los distintos acuíferos de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Desde el inicio de los controles. Se puede observar que el acuífero del Alto Guadalentín es uno de los que más descenso piezométrico han experimentado, por encima de los



100 m, como ya habíamos visto en el párrafos y figuras anteriores, Figura 4.3.9, y en la Figura 4.3.10 un mapa de los distintos acuíferos, con representación de la estimación de la sobreexplotación de las distintas masas de agua de la demarcación, donde se observa que los acuíferos del Guadalentín son los más sobreexplotados de la demarcación.

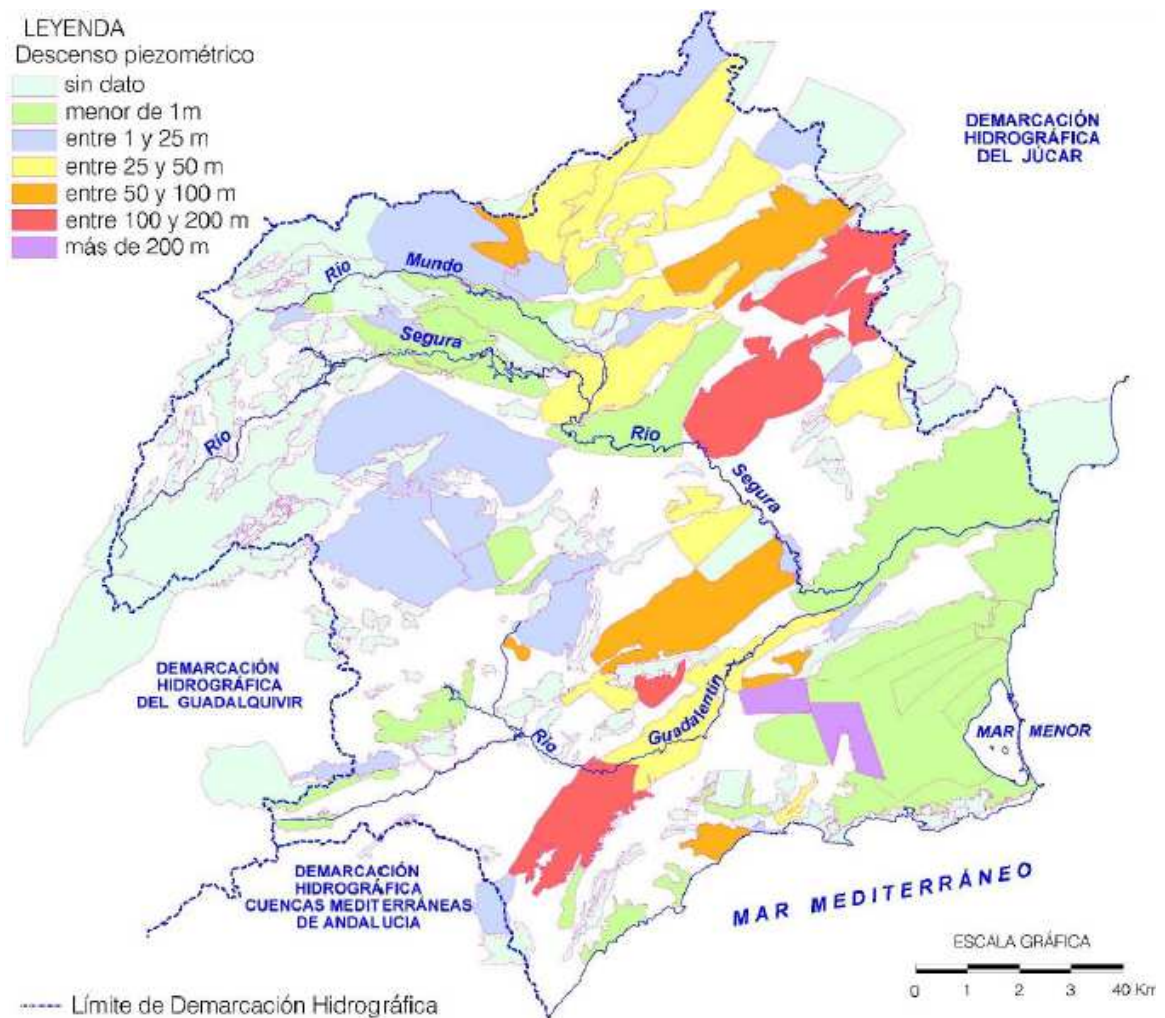


Figura 4.3.9: Mapa de los acuíferos de la Demarcación Hidrográfica del Segura, con representación de la variación piezométrica media desde inicio del control de los acuíferos.

Fuente: CHS (2015).

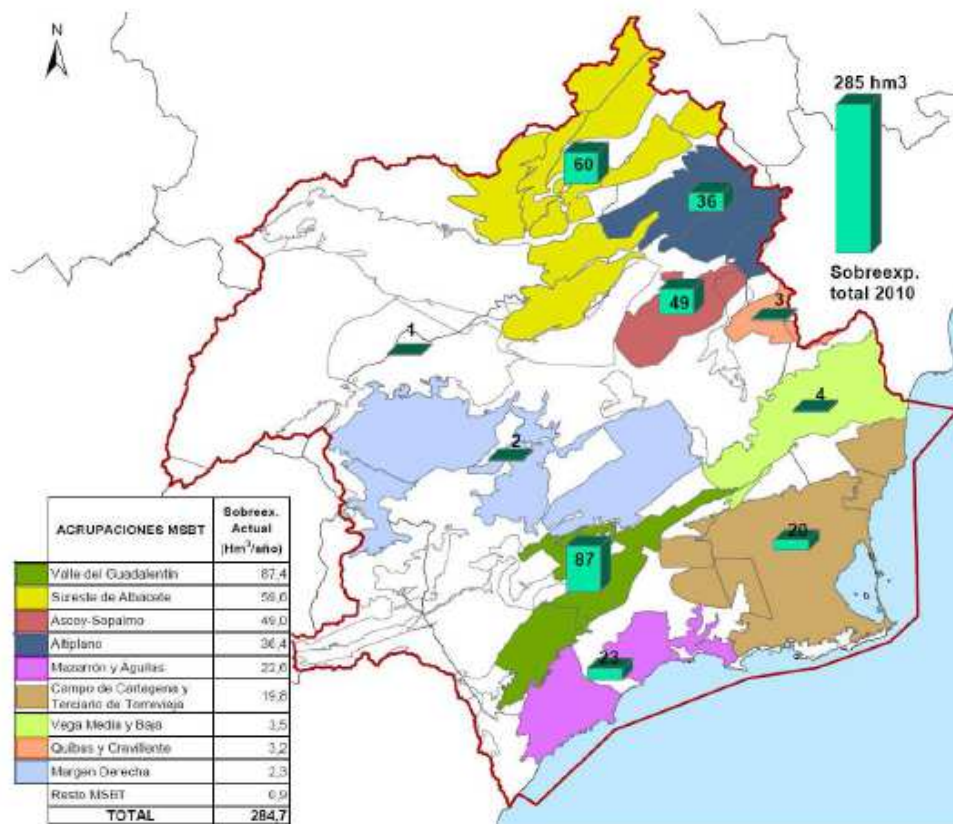


Figura 4.3.10: Estimación de la sobreexplotación de las masas de agua subterránea de la demarcación. Fuente: CHS (2015).

A continuación se muestra la evolución reciente de la cota piezométrica de los distintos sondeos de control del acuífero del Alto Guadalentín en los último 2 años a través de gráficos, en Figura 4.3.11y Figura 4.3.12.

En la mayor parte de los sondeos no se aprecia una tendencia clara al descenso o ascenso de la cota piezométrica en el periodo considerado (trienio 2013-2015), excepto en los sondeos 253960091, 253930119 y 253960113 en los que se aprecia un descenso, y el sondeo 253930094, en el que la cota piezométrica experimenta una subida.



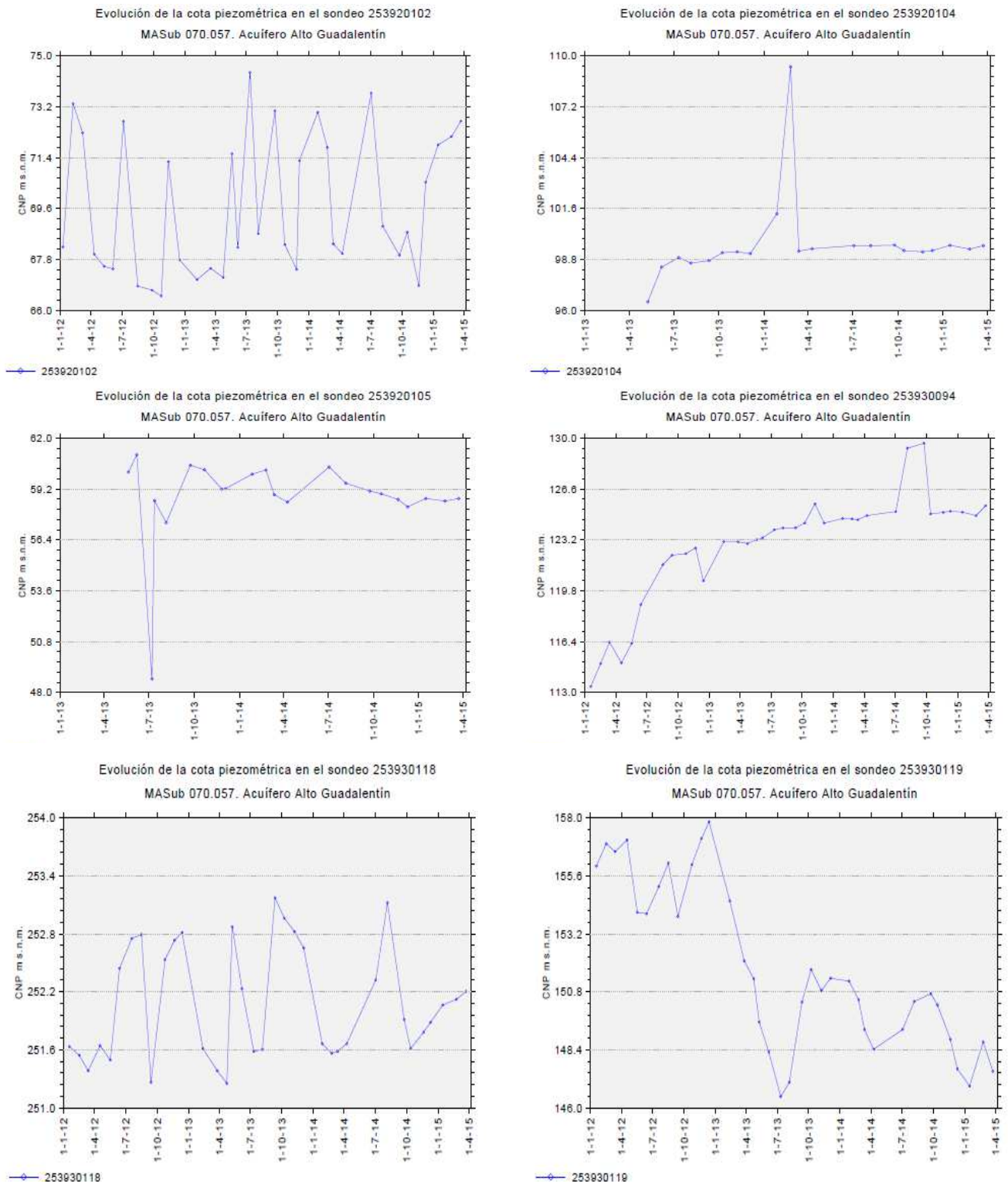


Figura 4.3.11: Evolución reciente de la cota piezométrica en los sondeos indicados del acuífero MASub 070.057. Acuífero Alto Guadalentín. Fuente: CHS (2015)

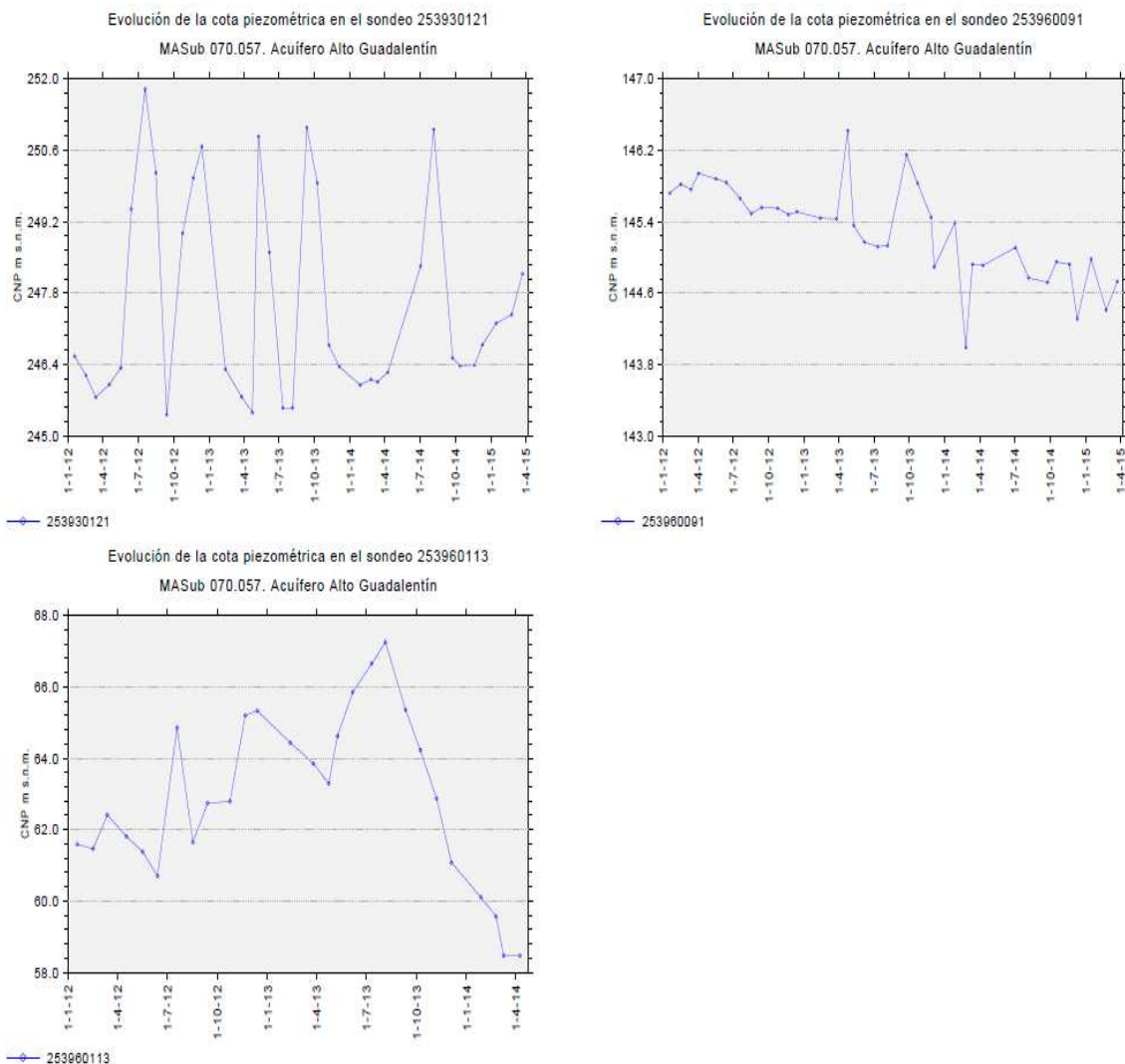


Figura 4.3.12: Evolución reciente de la cota piezométrica en los sondeos indicados del acuífero MASub 070.057. Acuífero Alto Guadalentín. Fuente: CHS (2015)

Respecto al piezómetro 253960113 (MASub 070.057 Alto Guadalentín), cabe destacar que el sondeo continua seco en la actual campaña por la afección de un pozo próximo, a fecha de marzo de 2015.

Por último, y para tener una mejor perspectiva de la evolución del acuífero, se muestran las series completas de los datos históricos de los distintos sondeos, en cuanto a evolución de las cotas piezométricas, relacionadas con las precipitaciones registradas en estaciones meteorológicas representativas

(explicación en Figura 4.3.13 y texto). Ver de Figura 4.3.14 a Figura 4.3.18.

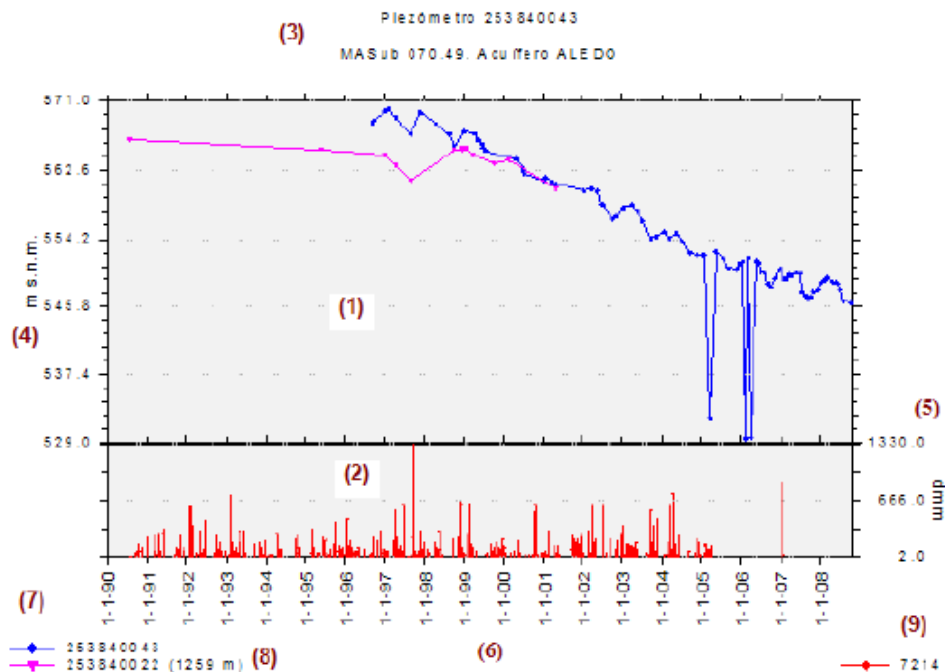


Figura 4.3.13: Ejemplo de gráfico de evolución de cota piezométrica en sondeos de control de acuíferos. Fuente: CHS (2015).

“El área del gráfico aparece dividida en dos: una superior (1), en la que se presentan las evoluciones de las cotas piezométricas, y otra inferior (2) en que se presenta la precipitación registrada en una estación meteorológica representativa. Esta última puede no estar presente en algunos gráficos si no se dispone de información para el periodo de control piezométrico representado.

El código del punto de control aparece en el título del gráfico (3), al que siguen en línea aparte la masa de agua subterránea (MASub) y el nombre del acuífero. Los valores piezométricos se presentan en el eje de las Y (4). Se expresan como alturas piezométricas, obtenidas de restar la cota sobre el nivel del mar (msnm) de la superficie del terreno en la que se sitúa el sondeo (en una referencia identificada en el mismo), de la profundidad del agua medida en una fecha determinada. Los datos de la precipitación en la estación meteorológica asociada

se presentan en un eje Y secundario (5), expresados en décimas de milímetro (dmm).

En el eje X (6) figuran las fechas de medida.

Si en un gráfico se presenta más de una evolución piezométrica, cada una de ellas tiene un color, asociado a cada sondeo, figurando en (7) su código con su color metros al sondeo principal (8).

El código indicativo de la estación meteorológica asociada figura en (9)". CHS (2015).

Se presentan los resultados a continuación:

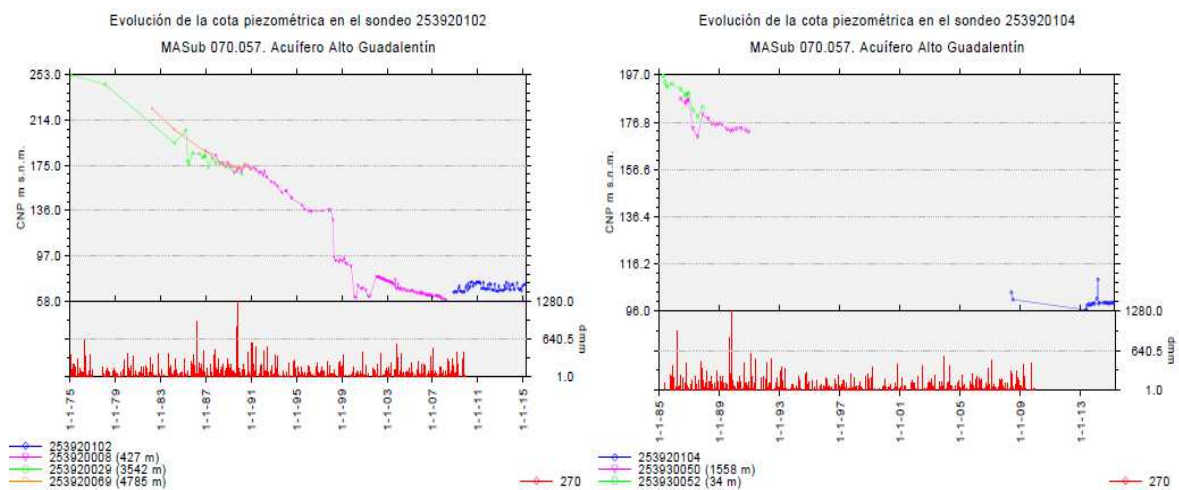


Figura 4.3.14: Evolución de las cotas piezométricas en los sondeos 253920102 y 253920104. Fuente: CHS (2015).

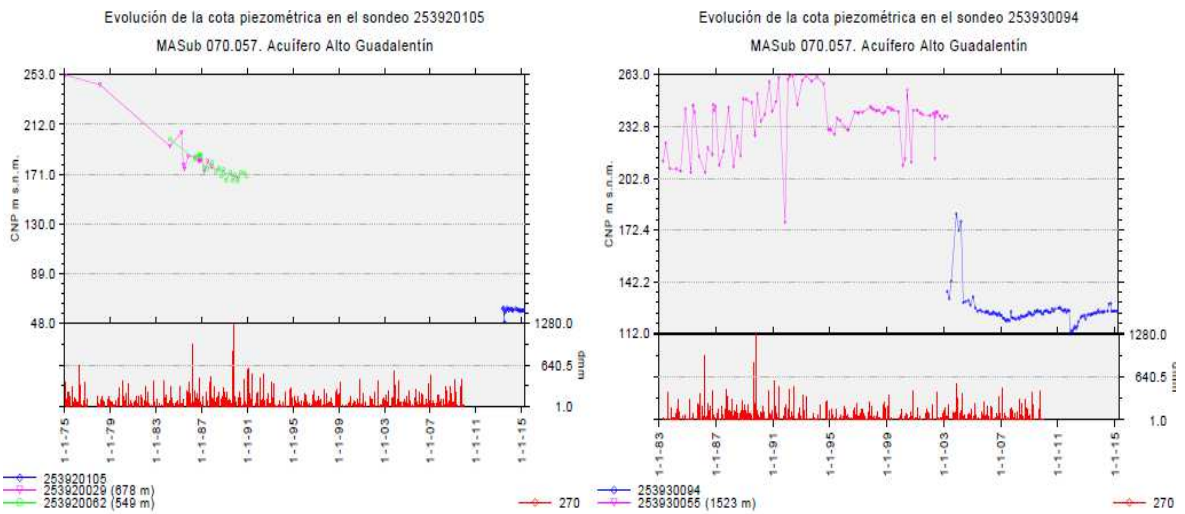


Figura 4.3.15: Evolución de las cotas piezométricas en los sondeos 253920105 y 253930094. Fuente: CHS (2015).

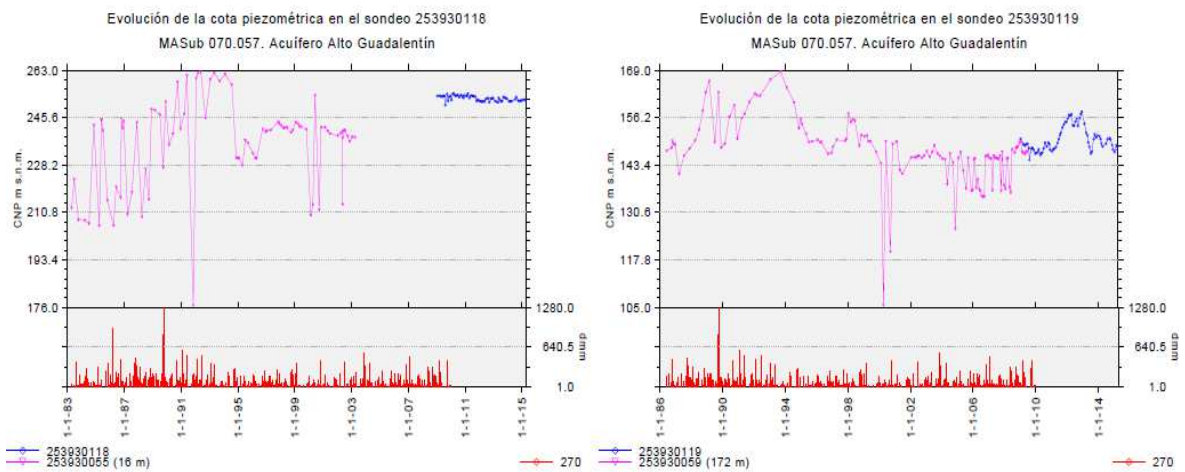


Figura 4.3.16: Evolución de las cotas piezométricas en los sondeos 253930118 y 253930119. Fuente: CHS (2015).



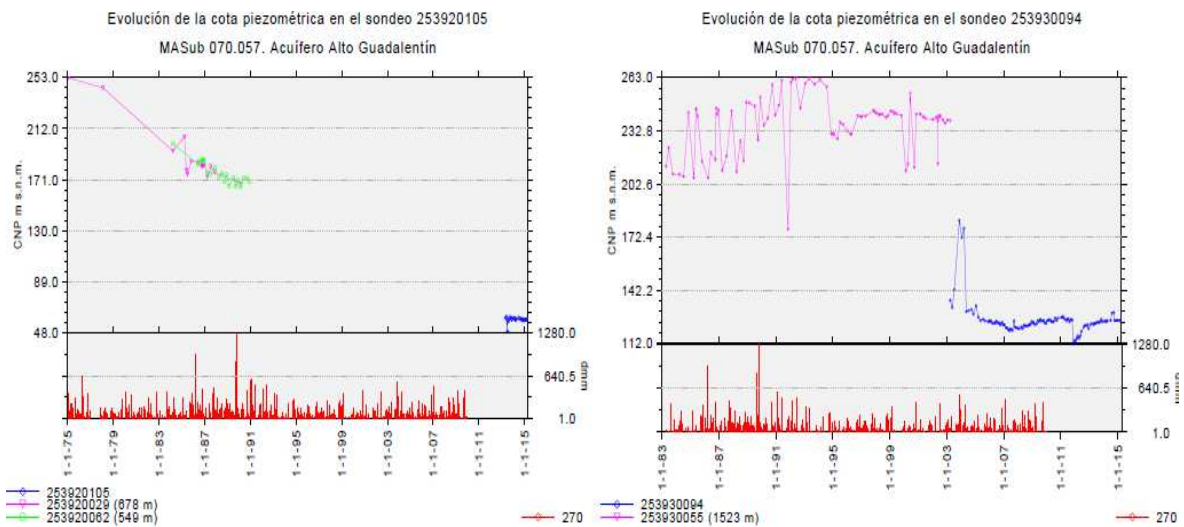


Figura 4.3.17: Evolución de las cotas piezométricas en los sondeos 253930105 y 253930094. Fuente: CHS (2015).

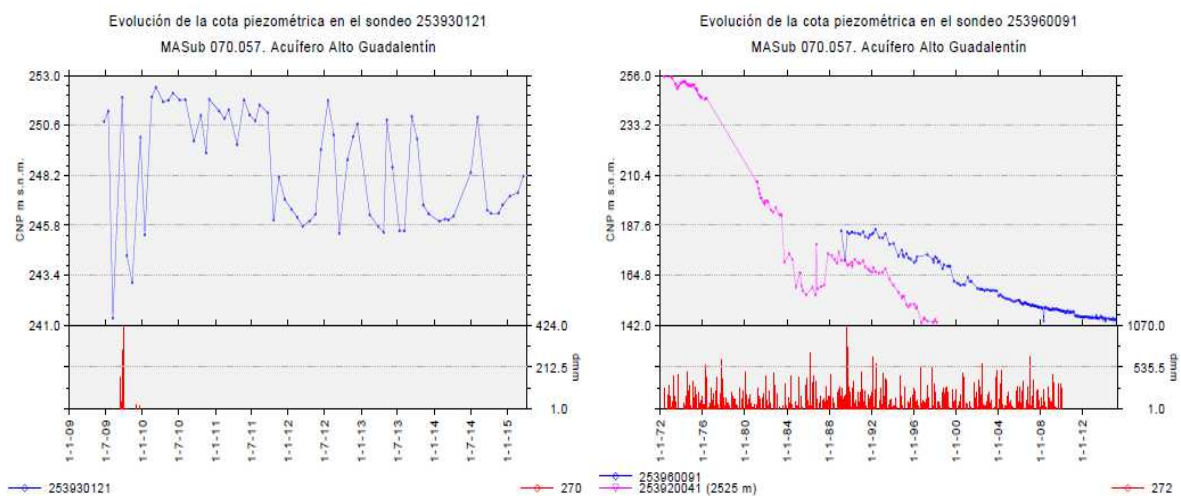


Figura 4.3.18: Evolución de las cotas piezométricas en los sondeos 253930121 y 253960091. Fuente: CHS (2015).

En los datos de las series históricas sí se se observa, en general, en la mayor parte de los sondeos la tendencia al descenso de la cota piezométrica comentada anteriormente, con la consiguiente sobreexplotación del acuífero.



#### **4.4. Geomorfología y tectónica**

Geográficamente, el Valle del Guadalentín es una extensa zona, con importantes contrastes orográficos donde alternan valles, sierras, depresiones y en su parte más oriental nos encontramos la costa, con interesantes playas y bahías.

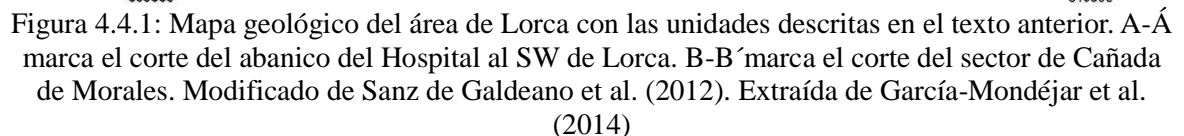
Destaca en el Nordeste Sierra Espuña, uno de los siete parques regionales con 1584 m y la Sierra Pedro Ponce que junto con la Sierra del Cambrón, que alcanza los 1518 m de altitud, se encuentran a la espalda de Sierra Espuña. También destaca por su importancia y ya en el litoral, el parque regional de Cabo Cope-Puntas de Calnegre que afecta a los municipios de Águilas y Lorca.

Desde un punto de vista más académico, resulta muy útil la descripción que realiza en su tesis, el Dr. Vázquez, en la que destaca que "el Valle del Guadalentín-Segura es una extensa depresión que se encuentra en el ámbito de las Cordilleras Béticas y forma una fosa tectónica subsidente, de 8 a 10 km de anchura en dirección OSO-ENE, marcada por la existencia de frecuentes sismos registrados y movimientos recientes de fracturas y flexuras en sus márgenes, lo que ha favorecido el desarrollo de un potente depósito de naturaleza detrítica en el Plio-Cuaternario y margosa en el Mioceno, con espesores de 300 y 1000 m, respectivamente".

"Hacia el norte y el sur el Valle del Guadalentín-Segura se limita por relieves constituidos por materiales neógenos, compuestos por margas, areniscas y conglomerados, y distintos afloramientos del zócalo paleozoico del Complejo Alpujárride, formado básicamente por filitas, cuarcitas y dolomías".

"El valle tectónico del Guadalentín y su continuación en la Vega Media del Segura forman una llanura fluvial donde se encajan los cauces divergentes de los dos ríos. El desnivel entre la llanura del Guadalentín y la Vega Media dio lugar al amplio cono de deyección por el que varios distributarios alcanzaban al Segura en

Para definir la geología de la zona, se presenta el siguiente mapa geológico en la Figura 4.4.1.



Máster Universitario en Ingeniería de los Materiales, del Agua y del Terreno

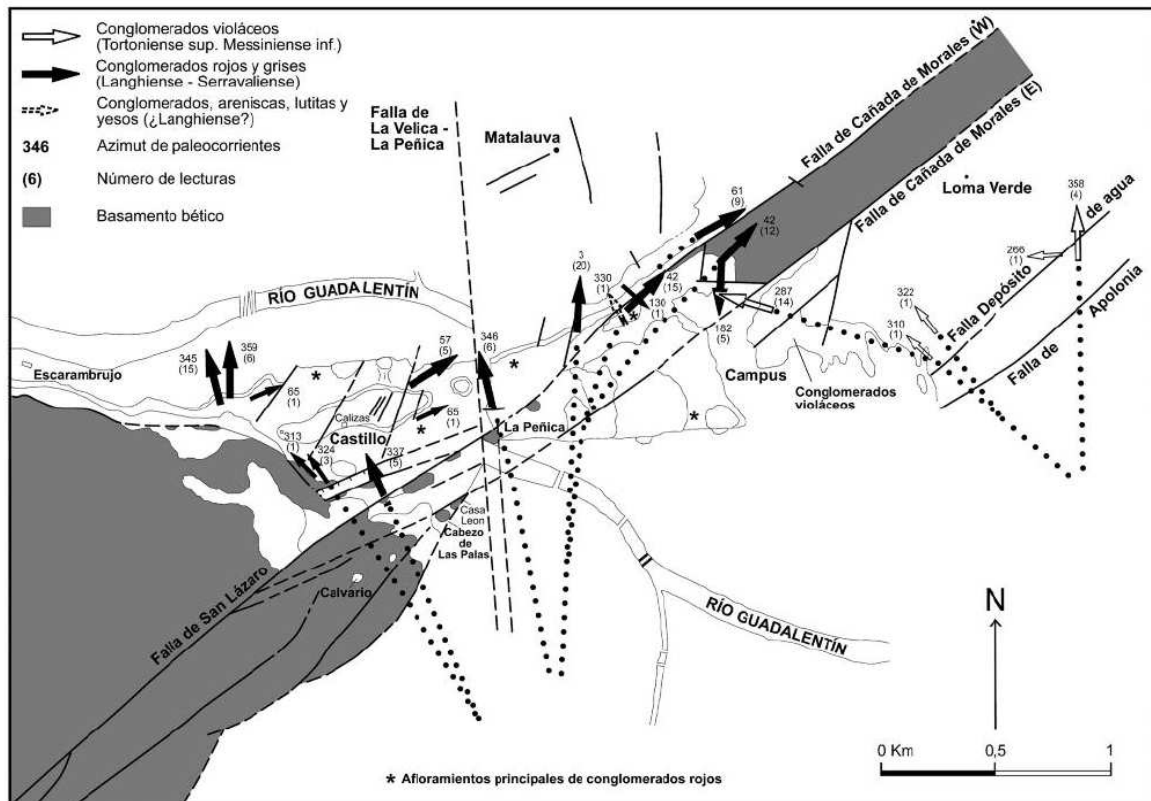


Figura 4.4.2: Mapa geológico simplificado con afloramientos del basamento Bético de la Zona Interna Bética, resaltados en trama gris, y falla de desgarre sinistrorsa La Velica-La Peñaica con restitución palinspástica para el Mioceno medio. Extraída de García-Mondéjar et al. (2014).

Por otra parte, según Echevarría et al. (2012), la zona sísmicamente más activa de la Península Ibérica corresponde al margen suroriental, abarcando la zona de Valencia, Murcia y Andalucía (Bufo et al., 1995). La deformación cortical en este área está controlada principalmente por la convergencia entre las placas de Nubia y Eurasia. Gran parte de esta sismicidad se atribuye a las fallas con componente de desgarre de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO o EBSZ en inglés). La ZCBO, de orientación NE-SO, está formada principalmente por las siguientes fallas: Falla Bajo Segura, Falla Carrascos, Falla Alhama de Murcia (FAM), Falla Palomares y la Falla Carboneras. La sismicidad instrumental en la ZCBO se caracteriza por terremotos superficiales de magnitud baja a moderada, no superiores a Mw6 (Bufo et al., 2004; Bufo et al., 1995; Stich et al., 2003). Desde el punto de vista tectónico, la falla de Alhama representada anteriormente y cuya columna estratigráfica se muestra en la Figura 4.4.3, y cuyo corte geológico

se observa en la Figura 4.4.4 marca las pautas de la actividad sísmica y controla el comportamiento tectónico de la zona, que es una de las regiones del país con mayor aceleración sísmica de cálculo



Figura 4.4.3: Columna estratigráfica de los materiales de la zona de falla de Alhama de Murcia aflorantes en el sector de Lorca. Se representan potencias máximas excepto en la unidad Margas, calcarenitas y cherts del Llano de la Serrata, que carece de afloramientos con sucesión vertical completa. Extraída de García-Mondéjar et al. (2014).

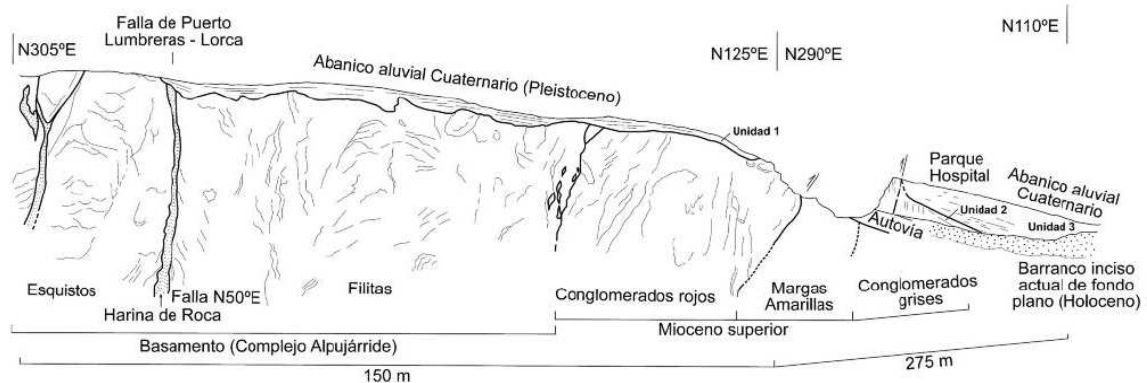


Figura 4.4.4: Corte geológico de la zona de falla FAM en las inmediaciones del Hospital ( $\approx 4$  km al SW de Lorca, A-Á en Fig. 2). Depósitos elevados del abanico aluvial cuaternario pleistoceno (unidad 1) fosilizan trazas antiguas de la FAM. A la derecha de la figura se observa el lóbulo de abanico del parque del Hospital (unidades 2 y 3), así como el barranco inciso del Holoceno. La traza de falla más joven de la FAM (autovía) produjo un basculamiento tectónico separando en el tiempo la formación de las unidades 1 y 2-3 del abanico pleistoceno. Dibujo a partir de fotografías. Extraída de García-Mondéjar et al. (2014).

Como se ha comentado anteriormente, el Valle del Guadalentín es una zona con una importante actividad tectónica, lo que supone riesgos desde el punto de vista sísmico. La aceleración básica de cálculo se encuentra entre 0,12g y 0,16g, según la norma de construcción sismorresistente (NCSR-02), ver Figura 4.4.5.

El último episodio sísmico de importancia ocurrió el 11 de mayo de 2011, con un sismo de magnitud 5,1, en la escala de magnitud del momento que produjo innumerables daños materiales y la pérdida de 9 vidas humanas.

El sismo tuvo lugar con epicentro a unos 3 km al Noreste de Lorca, coincidiendo con la traza de la Falla de Alhama (Figura 4.4.6), e hipocentro a unos 1000 m de profundidad, una profundidad excepcionalmente pequeña, que combinada con una magnitud moderada, provocó efectos devastadores en las construcciones, que más de 4 años después aún se están reconstruyendo.

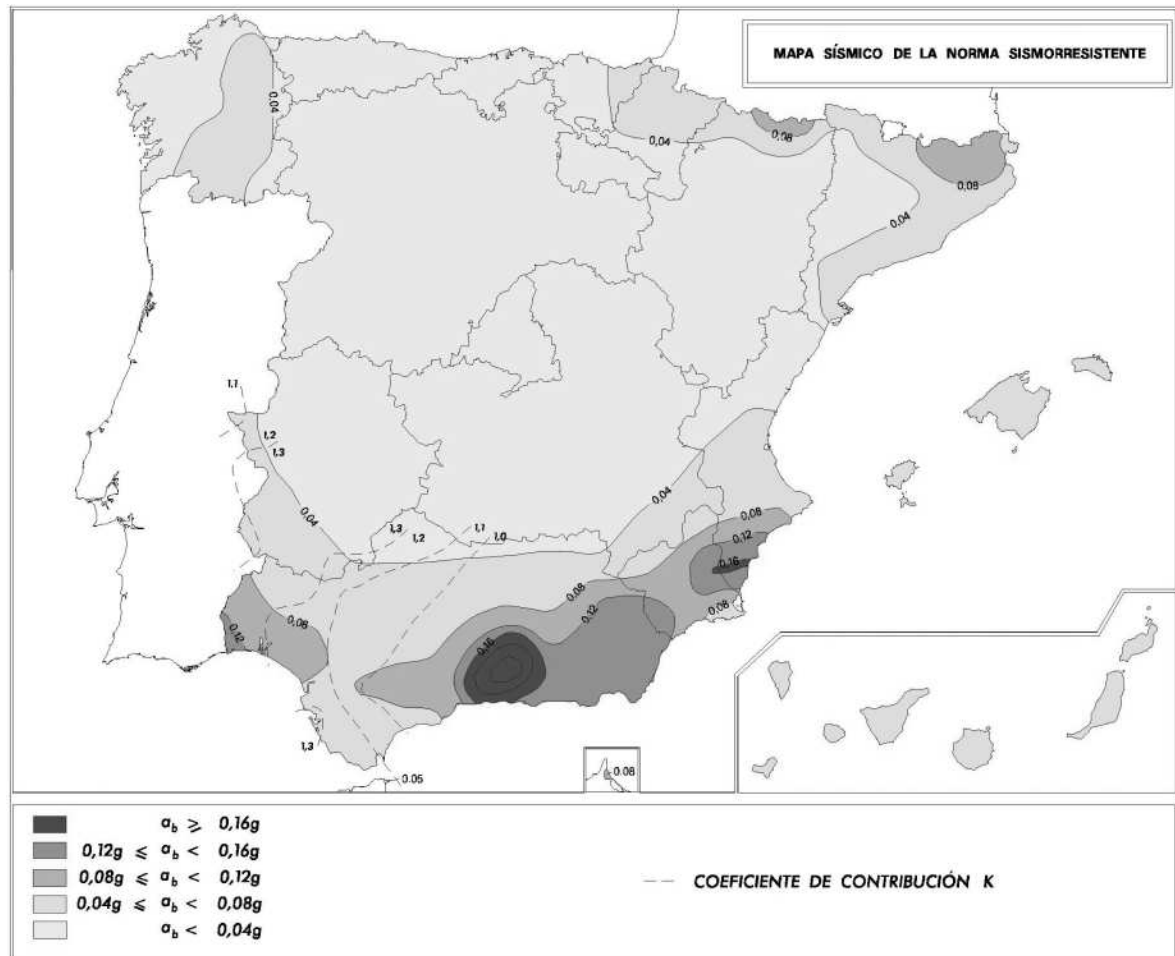


Figura 4.4.5: Mapa de peligrosidad sísmica. Fuente: Norma Construcción Sismorresistente (NCSE).



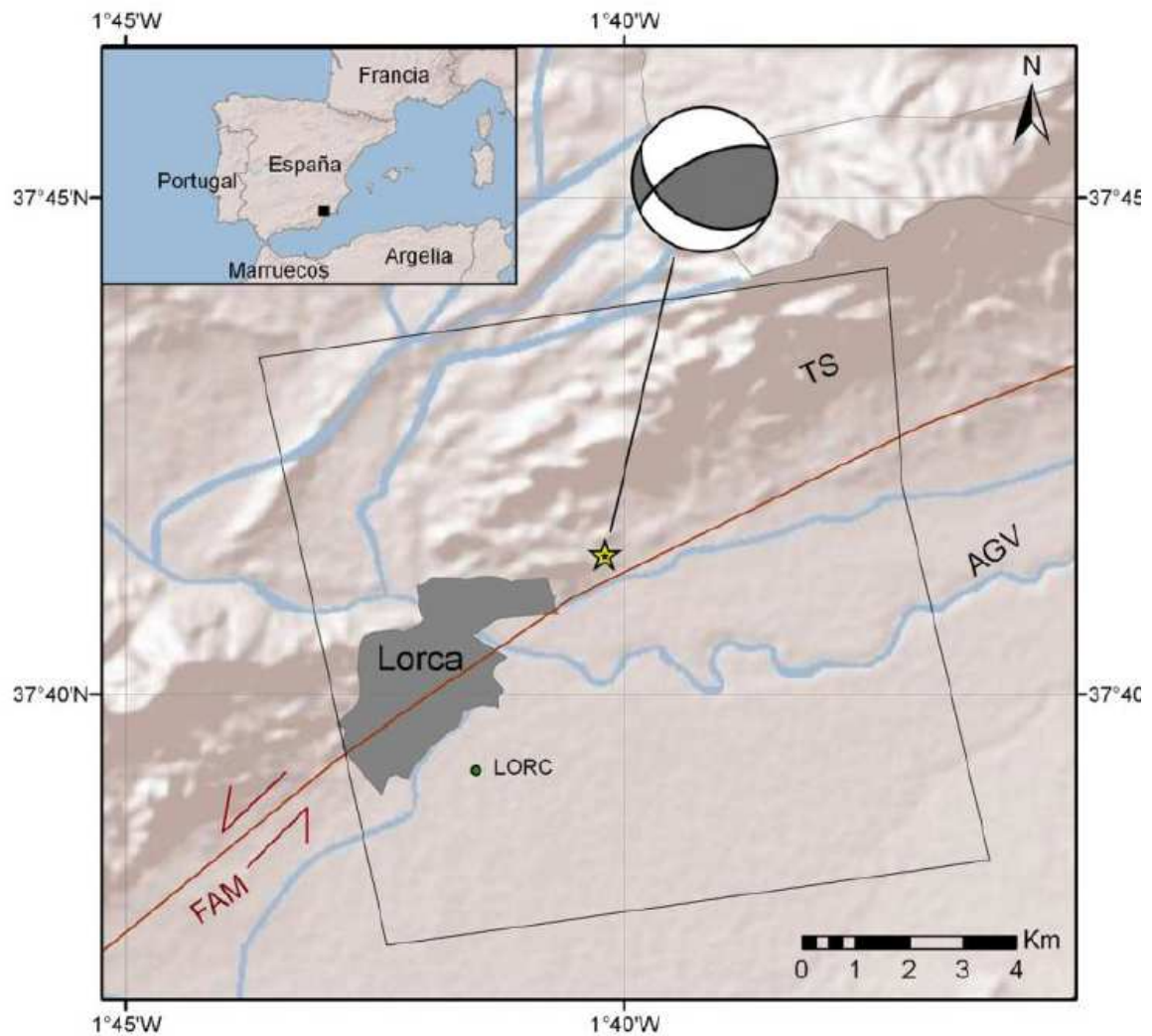


Figura 4.4.6: Zona de estudio en el sureste de España en la que se muestra la traza de la falla principal en rojo; la localización epicentral del sismo principal del 11 de mayo de 2011, con una estrella (IGN, 2011); el mecanismo focal del terremoto principal (Delouis, 2011). El contorno negro delimita el área mostrada en la Figs. 3a y 3b; AGV: Valle del Alto Guadalentín; FAM: Falla de Alhama de Murcia; TS: Sierra de la Tercia. Extraída de Frontera et al. (2012).

## **CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## **5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1. Causas y características propias de la subsidencia en la zona**

En el trabajo de Antón et al. (2014) se muestra un estudio de los acuíferos situados en el subsuelo del valle durante los últimos años y concluye que sólo uno de ellos está sobreexplotado, que además afecta a una superficie relativamente pequeña y no especialmente afectada por subsidencia, proponiendo otras posibles causas del fenómeno, como la tectónica y/o "piping".

A la vista de los datos obtenidos de la CHS y de la consulta bibliográfica, parece demostrado que la subsidencia detectada en la zona está provocada, principalmente, por la sobreexplotación de acuíferos, y que a pesar de la importante actividad tectónica en la zona la incidencia de la misma en el descenso de la superficie del terreno es mínima.

Del análisis de los datos concretos del acuífero del Alto Guadalentín (código 070.057), a través de los 9 sondeos de control de las variaciones de los niveles de cota piezométrica desde principios de la década de 1970, resulta que, si bien los datos de los últimos tres años no son capaces de mostrar una tendencia clara, las series completas de los datos históricos de los distintos sondeos, en cuanto a evolución de las cotas piezométricas, muestran un descenso claro del nivel piezométrico del acuífero estimado en 118,02 m desde el inicio de los controles, en 1972.

Los datos de evolución de acuíferos facilitados por la Confederación Hidrográfica del Segura, no dejan lugar a dudas de que la masa de agua subterránea del Valle del Guadalentín, que incluye los acuíferos del Alto Guadalentín y Bajo Guadalentín, es una de las más sobreexplotadas de la Demarcación Hidrográfica del Segura con una sobreexplotación actual de 87,4 hm<sup>3</sup>/año respecto a los 284,7 hm<sup>3</sup>/año totales de la demarcación.

Por otra parte, una de las singularidades del fenómeno de la subsidencia en el Valle del Guadalentín es que el descenso del suelo por subsidencia está demostrado y documentado tanto por sistemas InSAR como por GNSS, con tasas anuales de hundimiento que se acercan a los 160 mm, en las áreas más afectadas, desde el año 1992 como mínimo, y sin embargo no se han documentado muestras de los principales signos o consecuencias físicas asociados al fenómeno, al contrario de lo que ocurre en lugares como Murcia, México, Arizona, etc. con tasas de hundimiento comparables, o incluso inferiores en algunos casos.

Esta circunstancia se justifica con las siguientes explicaciones:

- Pese a que la magnitud de la subsidencia es muy grande, debido a la extensión de la zona afectada, los gradientes (distorsiones angulares) son bajos y por tanto, las zonas en las que se superan los umbrales admisibles (estados límite de servicio) son escasas, favoreciendo la uniformidad en los asientos producidos, lo que unido al hecho de que las áreas de mayor tasa de subsidencia se corresponden con áreas rurales de baja edificabilidad, clasificadas como "suelo urbanizable especial huerta" en el Plan General de Ordenación Urbana del municipio, con predominio de viviendas unifamiliares, de una o dos plantas, puede ser una de las causas de que no proliferen las típicas patologías provocadas por asientos diferenciales como grietas en estructura, cerramientos y particiones de las construcciones.
- Otro de los motivos para explicar la diferencia en cuanto a manifestación de la subsidencia por sobreexplotación de acuíferos en el Alto Guadalentín, respecto a otros lugares donde se produce el mismo tipo de subsidencia, es la profundidad de explotación de los acuíferos, que en el caso del Valle del Guadalentín es bastante grande, debido al descenso de los niveles piezométricos, pudiendo llegar incluso a los 400 m, mientras que en el acuífero de la Vegas Media y Baja del Segura (MASUB 070.036), cuya sobreexplotación

afecta a la subsidencia de la ciudad de Murcia, la profundidad es mucho menor, del orden, de 15 a 20, ya que, en el caso concreto de la ciudad de Murcia; está ligada al drenaje necesario para la construcción de sótanos, así como a los pozos necesarios para la limpieza de calles y el riego de jardines, más que a la explotación propiamente dicha con fines agrícolas o urbanos, que en todo caso es mucho más baja que en la cuenca del Guadalentín, puesto que las cotas piezométricas de los acuíferos se sitúan entre los 10 y los 40 m (según datos de la CHS de los sondeos de control del acuífero MASUB 070.036). Este hecho, al igual que las bajas distorsiones, contribuye a la uniformidad de los asentos, ya que al producirse estos desde profundidades mucho mayores se favorece una absorción mucho más uniforme de las deformaciones a través de los distintos estratos de terreno hasta llegar a la superficie, frente a la prevalencia de los asentos diferenciales en la ciudad de Murcia. Por lo tanto, esta baja incidencia de asentos diferenciales unida a un tipo de edificación más bien aislada y de baja altura puede explicar, también, la escasa incidencia del fenómeno de subsidencia en forma de patologías en las construcciones en el caso que nos ocupa.

- Como se ha comentado en apartados anteriores, el Valle del Guadalentín es una vega muy fértil en la que, desde tiempos remotos, ha existido una intensa actividad agrícola, circunstancia importante a la hora de explicar la dificultad para encontrar grietas en el terreno originadas por subsidencia. Este tipo de grietas suele aparecer en los límites del área afectada por subsidencia como consecuencia de la tracción a la que se ven sometidos los estratos del terreno, y según el plano de subsidencia de González et al. (2012) dicho límite se encuentra en zonas con un alto grado de explotación agrícola en las que cualquier grieta que pueda aparecer en el terreno queda disimulada inmediatamente por los trabajos de arado y nivelación del terreno.

- Si bien es cierto que en el área afectada existe una extensa red de canales de riego que atraviesan la zona en todas direcciones, algunos de ellos de gran longitud, y que por lo tanto se deberían haber documentado numerosos

casos de canales en los que, sin duda, se ha tenido que invertir la pendiente en algunos tramos, también es cierto que, desde finales de los años 90 del siglo pasado, se han llevado a cabo numerosos proyectos de modernización de regadíos, mediante la sustitución de los antiguos canales de riego, alguno de ellos en servicio desde la época musulmana, por conducciones semienterradas de hormigón, en lámina libre y conducciones enterradas, a presión. Por lo que en la actualidad resulta difícil encontrar canales afectados por la subsidencia.



## 5.2. Correlación entre datos InSAR y patologías en construcciones

- Resultados en la búsqueda, identificación y análisis de las patologías localizadas en construcciones (PC).

Este apartado se presentan los resultados que se refieren a patologías detectadas en viviendas de las pedanías de Cazalla y Pulgara, como a las encontradas en las obras de paso de la Autovía Lorca-Águilas.

Pasamos a analizar cada una de ellas.

- Patologías detectadas en viviendas de la pedanía de Cazalla.

La primera de ellas, identificada como **PC-01**, corresponde a una vivienda (Figura 5.2.2) en la que se observan series de grietas principales a 45° en el muro exterior de arriostramiento, compatibles con asiento de la cimentación del muro. La vivienda se encuentra en zona de tasa de hundimiento media (Figura 5.2.30) y distorsión media, por lo que las grietas se podrían deber a la subsidencia, con lo que estaríamos ante una patología provocada por el fenómeno (ver ficha con datos básicos de localización en Figura 5.2.1 y resumen en FICHA Nº 1 en ANEXO).

CATEGORÍA	Patologías en construcciones	
DESCRIPCIÓN	Grietas en muro de arriostramiento de vivienda	
IDENTIFICACIÓN	<b>PC-01</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Cazalla	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,626464 N	1,650406 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	619092	4165228

Figura 5.2.1: Ficha de datos básicos de la incidencia PE-01. Fuente: elaboración propia



Figura 5.2.2: PC-01. Vivienda de los años 70 del siglo XX en la pedanía de Cazalla, mediante obra de fábrica de ladrillo con estructura de muros de carga y muros de arriostramiento.

En la segunda, cuya ficha de datos básicos se encuentra en Figura 5.2.3, resumen en FICHA N°2 de ANEXO, e imagen en la Figura 5.2.4, identificada como **PC-02**, se puede observar una grieta vertical en el centro del muro de arriostramiento, compatible con asentamientos del terreno. Se encuentra en la misma zona de tasas de hundimiento y distorsión medias, que el caso anterior, por lo que se puede deber a subsidencia.

CATEGORÍA	Patologías en construcciones	
DESCRIPCIÓN	Grietas en muro de arriostramiento de vivienda	
IDENTIFICACIÓN	<b>PC-02</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Cazalla	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,626160 N	1,649936 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	619134	4165195

Figura 5.2.3: Ficha de datos básicos de la incidencia PC-02.

La tercera patología identificada como **PC-03** (imagen en Figura 5.2.5, ficha de datos básicos en Figura 5.2.6 y resumen en FICHA Nº 3 de ANEXO) se observa una serie grietas por asiento aparecidas en un muro de cerramiento exterior de parcela mediante obra de fábrica de bloque. Está situada en la misma zona que las dos anteriores, por lo que dichas grietas se podrían deber igualmente al fenómeno de subsidencia, especialmente teniendo en cuenta de que se trata de un muro de construcción relativamente nueva que soporta cargas mínimas, que no justifican, en absoluto, el asiento del mismo.

El hecho de que todos los elementos estructurales afectados en las patologías **PC-01, PC-02 y PC-03** estén situados en una zona en la que se ha detectado una subsidencia y distorsión medias (Figura 5.2.30), además del hecho de que dichos elementos estructurales estén orientados en dirección NO-SE, coincidiendo con la dirección perpendicular a las isolíneas de subsidencia, parece indicar que las patologías se pueden deber al fenómeno.



Figura 5.2.4: PC-02. Vivienda de los años 70 del siglo XX, en la pedanía de Cazalla, con estructura de muros de carga y muros de arriostramiento de fábrica de ladrillo. Mayo de 2015.



Figura 5.2.5: PC-03, grietas en muro de cerramiento exterior en parcela en pedanía de Cazalla.

CATEGORÍA	Patologías en construcciones	
DESCRIPCIÓN	Grietas en muro de cerramiento de parcela	
IDENTIFICACIÓN	<b>PC-03</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Cazalla	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,626667 N	1,650278 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	619102	4165245

Figura 5.2.6: Ficha de datos básicos de la incidencia PC-03.

- Resultados de las patologías detectadas en estructuras de paso de la Autovía Lorca-Águilas.

En la Figura 5.2.8 observamos la que se ha identificado como **PC-04**, que se corresponde con un desplazamiento y giro relativos de ambas partes de una junta en una estructura de paso inferior de la vía RM-11 (Autovía Lorca-Águilas) en la pedanía de Campillo. Los datos básicos se muestran en la Figura 5.2.7 y el resumen en la FICHA Nº 4 del ANEXO.

El desplazamiento en la base ha sido de 50 mm, mientras que en coronación supera los 150 mm. Teniendo en cuenta que la altura es de 5,50 m, supone una distorsión angular de 0,018.

Recordemos que los valores límite de distorsión angular que establece el CTE oscilan entre 1/300 (0,003) y 1/2000 (0,0005).

CATEGORÍA	Patologías en construcciones	
DESCRIPCIÓN	Desplazamiento y giro en junta estructural de estructura de paso bajo RM-11	
IDENTIFICACIÓN	<b>PC-04</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Campillo	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,603333 N	1,69027 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	615559	4166187

Figura 5.2.7: Ficha de datos básicos de la patología PC-04.





Figura 5.2.8: PC-04. Desplazamiento y giro en junta estructural de paso inferior de Autovía Lorca-Águilas.

En la Figura 5.2.9 se observa el testigo que los técnicos de la Comunidad Autónoma han colocado para controlar el desplazamiento.

La estructura se encuentra en zona de subsidencia y distorsión altas (Figura 5.2.30), por lo que los desplazamientos y giros observados son totalmente compatibles con asientos diferenciales consecuencia de la misma coincidiendo,

además, que tanto el desplazamiento como el giro se han producido en el plano vertical que atraviesa perpendicularmente las isolíneas de subsidencia.



Figura 5.2.9: Desplazamiento y testigo de control en coronación de estructura. PC-04.

Si bien es cierto que la **PC-04** es la patología de este tipo con mayor desplazamiento y distorsión detectada en todas las obras de paso de la RM-11, en la mayoría de ellas se han encontrado patologías similares que se detallan a continuación.

Las siguientes patologías estructurales, identificadas como **PC-05** (lado Águilas) y **PC-06** (lado Lorca) pertenecen ambas a la misma estructura de paso y tienen características similares, por lo que se han analizado conjuntamente.



Figura 5.2.10: Giro en patología PC-05 (lado SE, Águilas).



Figura 5.2.11: Giro en patología PC-06 (lado NO, Lorca).

CATEGORÍA	Patologías en construcciones	
DESCRIPCIÓN	Giro relativo en juntas estructurales de estructura de paso bajo RM-11	
IDENTIFICACIÓN	PC-05 y PC-06	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Campillo	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,633611 N	1,684167 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	616102	4165979

Figura 5.2.12: Ficha de datos básicos de la patologías PC-05 y PC-06.

La patología **PC-05** (Figura 5.2.10) presenta un desplazamiento de 35 mm en la base de la junta, que tiene una altura de 4 m, por lo tanto una distorsión angular

de 0,00875, mientras que en la patología **PC-06** (Figura 5.2.11) se midió un desplazamiento de 50 mm en la base, con una distorsión de 0,0125. La ficha de datos básicos se encuentra en la Figura 5.2.12 y el resumen en las FICHAS N°5 y N° 6 del ANEXO, respectivamente.

Estas patologías presentan una distorsión angular menor que la **PC-04**, dándose la circunstancia de que los giros se han producido en el plano vertical paralelo a las isolíneas de subsidencia.

A continuación se muestran los resultados de la patología **PC-07**, que se encuentra en la misma estructura que las anteriores (ver ficha de datos básicos en Figura 5.2.13 y resumen en FICHA N° 7 del ANEXO).

CATEGORÍA	Patologías en construcciones	
DESCRIPCIÓN	Grieta a 45° en aleta de contención de terraplenes de estructura de paso bajo RM-11	
IDENTIFICACIÓN	<b>PC-07</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Campillo	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,633611 N	1,684167 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	616102	4165979

Figura 5.2.13: Ficha de datos básicos de la patología PC-07.

En la imagen se observa una grieta a 45° por arco de descarga en una de las aletas de contención de terraplenes de la estructura.

Como se observa en la imagen (Figura 5.2.14), se trata de una aleta de hormigón armado en la que se aprecia una grieta a 45° que recorre de arriba a abajo, de derecha a izquierda. Este tipo de grietas no es común en estructuras de hormigón armado, lo que indica un importante asiento del terreno, que puede deberse a subsidencia.





Figura 5.2.14: Patología PC-07, donde se aprecia la grieta a 45° por arco de descarga provocado por asiento del terreno.

A continuación se presenta la patología **PC-08** (datos básicos en Figura 5.2.15 y resumen en FICHA Nº8 del ANEXO).

CATEGORÍA	Patologías en construcciones	
DESCRIPCIÓN	Desplazamiento relativo de elementos estructurales perpendiculares en junta estructural de estructura de paso bajo RM-11	
IDENTIFICACIÓN	<b>PC-08</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Campillo	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,617778 N	1,673056 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	617107	416423

Figura 5.2.15: Ficha de datos básicos de la patología PC-08.

Como se observa en la imagen (Figura 5.2.16) se ha producido un desplazamiento relativo de dos elementos estructurales de hormigón armado perpendiculares de una junta estructural.

Esto ha provocado la rotura de la arista del otro elemento de hormigón de los elementos. El desplazamiento observado es compatible con un asiento diferencial provocado por subsidencia, en función de la localización de la estructura, en área de subsidencia y distorsión medias.



Figura 5.2.16: Patología PC-08.



La últimas patologías de este tipo que se presentan, localizadas en las estructuras de paso de la RM-11 (ficha de datos básicos en Figura 5.2.17), que se encuentran en la misma estructura, se corresponden también con giros relativos de elementos estructurales y están conectadas entre sí por la junta estructural de la solera, Figura 5.2.19 para **PC-09** (lado Lorca) y Figura 5.2.18 para **PC-10** (lado Águilas).

En ambos casos se trata de un desplazamiento en la base de 15 mm, con lo que para una altura de 4,5 m resulta una distorsión de 0,0033.

CATEGORÍA	Patologías en construcciones	
DESCRIPCIÓN	Giro relativo de elementos estructurales perpendiculares en juntas estructurales de estructura de paso bajo RM-11	
IDENTIFICACIÓN	<b>PC-09 y PC-10</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Campillo	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,604217 N	1,663689.W
COORDENADAS UTM	X	Y
	617955	4162743

Figura 5.2.17: Ficha de datos básicos de las patologías PC-09 y PC-10.

Los giros que se observan en la base de ambas juntas estructurales son compatibles con asientos diferenciales producidos por subsidencia, teniendo en cuenta la localización de la estructura en un área de subsidencia baja pero distorsión media.

Concretamente, y como se puede comprobar en la Figura 5.2.30 y en las FICHAS RESUMEN Nº 9 y Nº 10 del ANEXO, en este caso el terreno presenta una subsidencia media de -0,20 m y una distorsión angular aproximada de 0,000357 catalogada como media según los valores preliminares del IGME.



Figura 5.2.19: Patología PC-09, (lado NO, Lorca).



Figura 5.2.18: Patología PC-10 (lado SE, Águilas).

Por lo tanto queda demostrado que existe una correlación entre la subsidencia en la cuenca del Alto Guadalentín y las patologías detectadas en las construcciones estudiadas en este trabajo (ver localización en cartografía SITMURCIA en Figura 5.2.20) comprobando la localización de las construcciones respecto a la cartografía de las isolíneas de subsidencia y distorsión angular (Figura 5.2.30).

En el ANEXO DE FICHAS RESUMEN se pueden comprobar, de forma esquemática, los resultados anteriormente expuestos.



Figura 5.2.20: Localización de las patologías en construcciones PC-01 a PC-10 en cartografía de SITMURCIA. Adaptada de SITMURCIA.

- Resultados de las patologías detectadas en un grupo de construcciones de la pedanía de Pulgara.

Para finalizar el apartado de patologías en construcciones se presentan los resultados de este grupo de construcciones formado por dos viviendas y un almacén, que se han identificado como patologías **PC-11** (grietas y desnivel de solado Vivienda 1), **PC-12** ( grietas en porche de vivienda 1), **PC-13** (grietas en almacén de Vivienda 1) y **PC-14** (grietas en Vivienda 2), que, al estar localizadas



muy próximas unas de otras, comparten la misma ficha de datos básicos (Figura 5.2.21).

CATEGORÍA	Patologías en construcciones	
DESCRIPCIÓN	Grietas en dos viviendas, almacén y porche en la pedanía de Pulgara	
IDENTIFICACIÓN	<b>PC-11, PC-12, PC-13 y PC-14</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Pulgara	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,664642.N	1,679148 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	616496	4169428

Figura 5.2.21: Ficha de datos básicos de patologías PC-11, PC-12, PC-13 y PC-14.



Figura 5.2.22: Localización relativa de las patologías de PC-11 a PC-14 en cartografía SITMURCIA. De arriba a abajo de la imagen: Vivienda 2, Almacén, Vivienda 1 y Porche. Fuente: adaptada de SITMURCIA.

La peculiaridad de estas patologías es que, si bien algunas de ellas habían aflorado con anterioridad al terremoto del 11 de mayo de 2011, otras han aparecido, y todas se han agravado de forma significativa a partir del mismo.

En la Figura 5.2.22 se puede la posición relativa de cada una de las construcciones, y en la Figura 5.2.30 la localización respecto a las isolíneas de subsidencia.

En las figuras siguientes se muestran las imágenes con las patologías detectadas. En la Figura 5.2.23 podemos apreciar una de las manifestaciones de dicha patología, en forma de arco de descarga sobre hueco de carpintería en tabique de fábrica de ladrillo, típico cuando se producen asientos.

En la Figura 5.2.24 se observa una grieta horizontal en el muro de arriostramiento, de fábrica de ladrillo, que es perpendicular a las isolíneas de subsidencia, por lo que es totalmente compatible con dichos asientos.



Figura 5.2.23: Grietas en forma de arco de descarga en tabique de fábrica de ladrillo en patología PC-11.

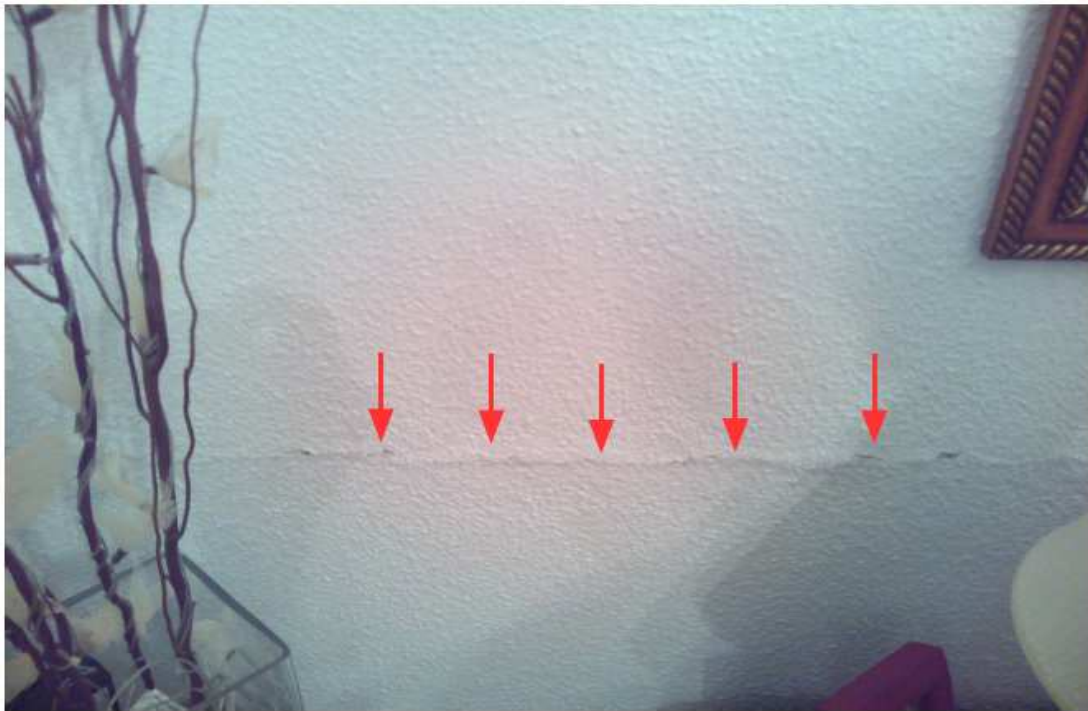


Figura 5.2.24: Grieta horizontal en muro de fábrica de ladrillo en patología PC-11.

En la Figura 5.2.25 observamos otra muestra de la patología **PC-11**, en forma de desnivel en el solado de la vivienda. Aunque la inclinación no es excesiva (se realizó una reforma hace pocos años), sí que se aprecia cierto desnivel que coincide con la dirección y sentido de evolución de la subsidencia (hacia SE). En la Figura 5.3.13 apreciamos los signos de la patología **PC-12** en el porche de la vivienda, mediante grietas en el empotramiento del porche en la vivienda y en el solado del propio porche, que se ha separado del muro de carga de la vivienda.





Figura 5.2.25: Desnivel en solado en patología PC-11.



Figura 5.2.26: Patología PC-12. Grietas en porche, (a) en empotramiento de porche en vivienda, y (b) entre solado de porche y muro de carga de vivienda.

En la figura Figura 5.2.27 observamos las grietas de la patología **PC-13**, en el almacén de la Vivienda 1, construido con muros de fábrica de ladrillo, en el año 1997 y cuyas patologías surgieron en mayo de 2011 tras el terremoto.



Figura 5.2.27: PC-13. Grietas en almacén de la Vivienda 1. (a) Grieta vertical desde el interior. (b) Grieta a 45° en encuentro de muro de arriostramiento y muro de carga, desde el exterior. (c). Grieta horizontal desde el interior.

En la figura Figura 5.2.28 observamos la grieta horizontal que recorre la fachada SE de la Vivienda 2, construida en la década de 1970, que se ha identificado como **PC-14**, que constituye uno de los muros de carga de fábrica de ladrillo de la vivienda. La grieta apareció por el año 2008 pero se acentuó con el terremoto.



Figura 5.2.28: Patología PC-14. Grieta horizontal en muro de carga de Vivienda 2.

Las construcciones de las patologías **PC-11 a PC-14** se encuentran en zona de subsidencia y distorsión altas (Figura 5.2.30), pero en este caso al otro lado de la zona de máxima subsidencia, en relación a las patologías descubiertas en las construcciones de la pedanía de Cazalla (**PC-01 a PC-03**). Por otra parte todas las patologías se corresponden con asientos del terreno que, en la mayoría de los casos queda demostrado que se han producido en la dirección y sentido de la línea de máxima pendiente de subsidencia (Figura 5.2.30), lo que podría confirmar la misma como causa de las mismos.

La Vivienda 1 se construyó a principios de la década de 1970 mientras que el el porche se construyó 20 años más tarde, a principios de los 90, sobre terreno muy consolidado.

Según testimonios de los dueños, las grietas de la vivienda aparecieron tras el terremoto de 2011, y se han ido agrandando progresivamente desde esa fecha.

Inmediatamente después del terremoto se quedaron marcadas las fisuras, y los 4 años siguientes han ido agrandando cada vez más.

En la Figura 5.2.25 se observa cómo el pavimento de la vivienda se ha inclinado en el sentido de la subsidencia determinada por InSAR.

Sin embargo las grietas y hundimiento del porche, en el sentido de evolución de la subsidencia, comenzaron nada más construirse, sobre un terreno muy consolidado ya, como hemos comentado, por lo que los asientos del terreno sólo se pueden justificar por motivos ajenos al estado del terreno superficial y a las cargas que recibe, que son muy pequeñas.

Por otra parte, también se han detectado grietas en el asfalto (Figura 5.2.29) y entre el asfalto y los muros de cerramiento de las parcelas, lo que indica que no se trata de un fenómeno local que afecte sólo a las construcciones.

A falta de investigar y aclarar el hecho de que las grietas en las viviendas no aparecieran hasta el terremoto de 2011 mientras que las del porche se iniciaron a principios de la década de 1990 todos los datos parecen confirmar que las patologías tienen su origen en la subsidencia.

En la Figura 5.2.30 podemos observar la localización de todas las patologías detectadas en construcciones, en la cartografía de isolíneas de subsidencia, donde se puede apreciar todo lo indicado anteriormente.

En el ANEXO se pueden consultar las FICHAS RESUMEN, de cada una de estas 4 patologías, de FICHA Nº 11 a FICHA Nº 14.





Figura 5.2.29: Grieta en el asfalto junto a almacén de vivienda (PC-13). Fuente: elaboración propia.



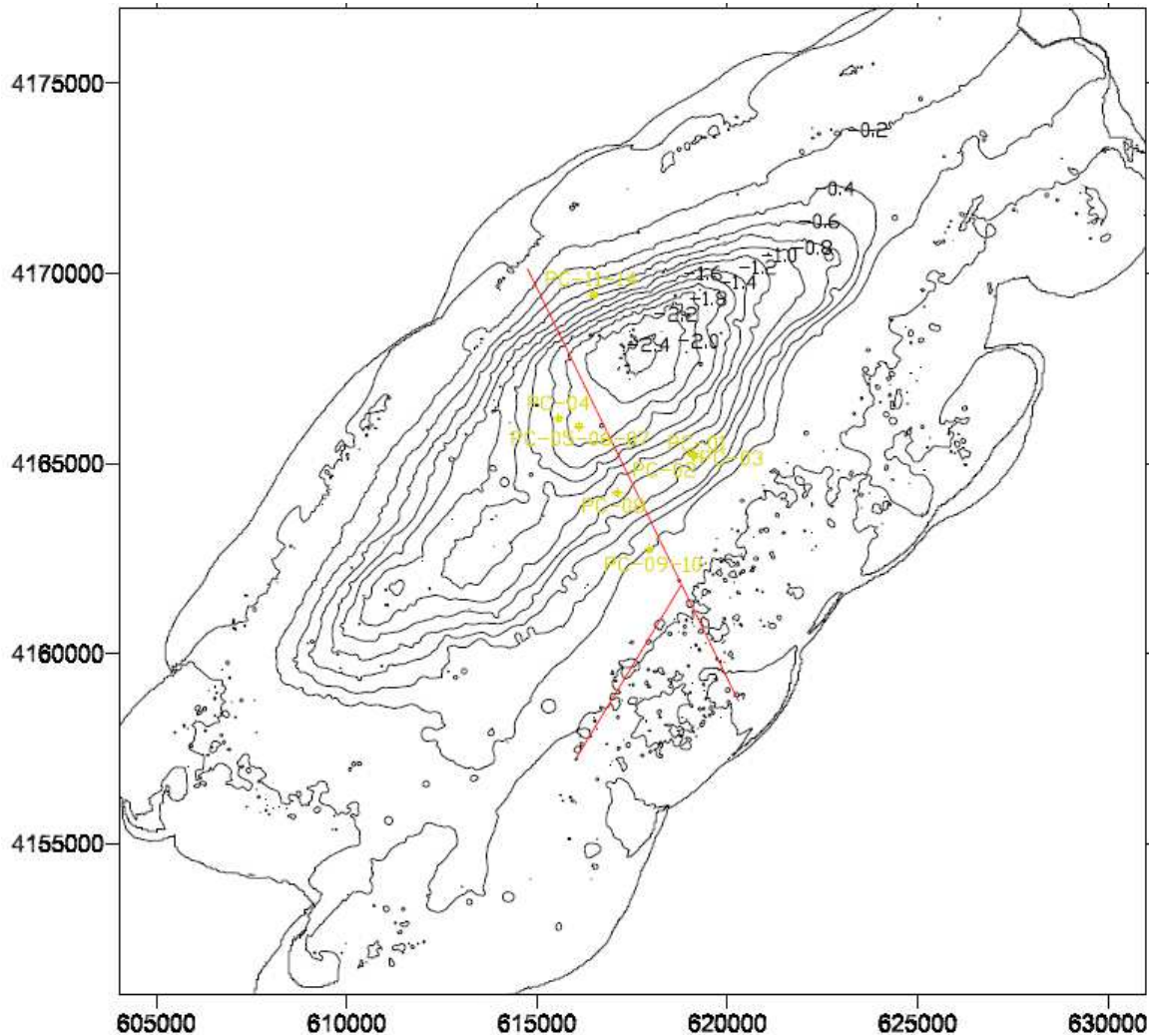


Figura 5.2.30: Localización de las patologías en construcciones, de PC-01 a PC-14, en la cartografía de isolíneas de subsidencia, con indicación de los valores medios de hundimiento en el periodo 1992-2012. En rojo y como referencia los tramos rectos de la RM-621 (Lorca-Águilas) y cruce con la RM-620 (hacia Pulpí).

### 5.3. Correlación entre datos InSAR e incidencias en canales de riego

- Resultados de la comprobación de asientos producidos en tramos del canal trasvase Tajo-Segura, **IC-01**.

Aunque el tramo de canal está situado en los límites del área de subsidencia delimitada por González y Fernández, se consideró conveniente estudiar los asientos detectados en algunos tramos del canal, concretamente todos ellos situados sobre pasos de drenaje de ramblas y barrancos de la Sierra de Tercia, y que habían necesitado de obras de recrecido de los cajeros del canal a efectos de no perder sección útil.



Figura 5.3.1: IC-01. Tramo del canal trasvase Tajo-Segura.

En la Figura 5.3.1 se observan los efectos del asiento de uno de los tramos de canal, cuyos datos básicos se especifican en la Figura 5.3.2, y resumen en FICHA Nº 15 del ANEXO, tanto en los cajeros del mismo, donde ha sido necesario

Máster Universitario en Ingeniería de los Materiales, del Agua y del Terreno

realizar trabajos de recrecido del mismo, en forma triangular con asiento máximo de 35 cm en el centro, coincidiendo con la vertical de la obra de drenaje, como en pavimento de la vía de servicio, donde se observa tanto el hundimiento como el agrietamiento del firme.

Tanto el hecho de estar en fuera del área de influencia como la circunstancia de que todos los casos estaban sobre terraplenes construidos sobre obras de drenaje apuntaban a que no se debía a la subsidencia, lo que se confirmó mediante consulta con un Ingeniero Técnico de Obras Públicas de la Confederación Hidrográfica del Segura, que justificó la patología por un comportamiento anómalo de los terraplenes tras las avenidas.

CATEGORÍA	Incidencias en canales	
DESCRIPCIÓN	Asiento en tramo del canal Trasvase Tajo-Segura	
IDENTIFICACIÓN	<b>IC-01</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Tercia	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,704589	1,637330 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	620120	4173913

Figura 5.3.2: Ficha de datos básicos de la patología IC-01.

- Resultados de comprobación de incidencias en un canal de riego secundario en las pedanía de Aguaderas, **IC-02**.

En la Figura 5.3.3 se muestra un canal de riego de pequeña sección localizado en la pedanía de Aguaderas, en el límite de la zona de subsidencia.

Se trata de un canal secundario de riego (datos básicos de la incidencia en la Figura 5.3.4 y resumen en FICHA Nº 16 del ANEXO), y de bastante antigüedad, por lo que no hay justificación para que el terraplén sobre el que se sitúa presente

asientos, sin embargo, se comprueba que presenta deformaciones de hasta 50 mm en la pendiente de la solera, y que ha sufrido asientos y deformaciones en la alineación, así como giros respecto al plano vertical de la alineación.



Figura 5.3.3: IC-02. Canal de secundario en la pedanía de Aguaderas.

Las anomalías podrían deberse a descalce por lavado del terraplén sobre el que está situado, debido a pérdidas de flujo por insuficiente mantenimiento; aunque también cabe la posibilidad de que estén ocasionadas por subsidencia, puesto que si bien se ubica en zona de subsidencia baja o nula, también es cierto que discurre paralelo a las isolíneas de subsidencia en la zona, y que en dichas zonas se observa una distorsión angular alta que podría explicar, especialmente el caso de los giros que se producen hacia la zona de subsidencia.

CATEGORÍA	Incidencias en canales	
DESCRIPCIÓN	Cambios de pendiente, asientos y giros en canal	
IDENTIFICACIÓN	<b>IC-02</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Aguaderas	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,609189N	1,638122 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	620204	4163328

Figura 5.3.4: Ficha de datos básicos de la patología IC-02.

- Resultados de la comprobación de la inversión de la pendiente en un canal de la pedanía de Campillo, **IC-03**.

El caso de este canal es especialmente significativo, ya que no ha sufrido ninguna modificación y actuación desde su construcción a mediados de los años 80 del siglo pasado.

El canal (imagen en Figura 5.3.5) se ubica en la pedanía de Campillo, y concretamente en el llamado “paraje del Salar”, en una zona donde, según testimonios de vecinos, agricultores y trabajadores de la Comunidad de Regantes de Lorca, se han invertido las pendientes de varios brazales y canales y canales de riego.

Se trata de un canal trapezoidal de pequeña sección, de 30 cm de base inferior y altura, y 40 cm de base superior, y 224 m de longitud (medido sobre cartografía SITMURCIA y comprobado en terreno con estación total y prisma), que se construyó a mediados de la década de 1980 del siglo pasado, y que se ha mantenido intacto durante ese tiempo (aseguran tanto el dueño del terreno como el arrendatario de la finca que no han se ha realizado ningún tipo de actuación). Ver ficha de datos básicos en Figura 5.3.6 y resumen en FICHA Nº 17 del ANEXO.





Figura 5.3.5: Canal con pendiente invertida en Campillo. IC-03: Sentido de la pendiente original en rojo y de la pendiente actual en azul.

CATEGORÍA	Incidencias en canales	
DESCRIPCIÓN	Inversión de la pendiente en un canal de riego	
IDENTIFICACIÓN	IC-03	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Campillo	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,635556 N	1,682222 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	616360	4162690
	616155	4162782

Figura 5.3.6: Ficha de datos básicos de la patología IC-03.

Lo curioso de este caso es que se construyó perpendicular a la Rambla Biznaga, con pendiente descendente desde NO hacia SE, siguiendo la pendiente natural del terreno, hacia la citada rambla (Figura 5.3.8) ya que la Rambla



Biznaga ha sido la cuenca de drenaje natural de esa zona; sin embargo hace unos 15 años empezó a presentar problemas de pendiente hasta que resultó imposible el riego a través del mismo, ya que el agua se estancaba y no fluía en el sentido que lo había hecho hasta ese momento, por lo que el canal estuvo sin uso durante algunos años, hasta que el dueño tuvo la idea de probar a transportar el agua en sentido contrario, que es como se está usando en este momento, con mayor velocidad del agua que cuando funcionaba en el otro sentido, ya que la pendiente actual es de 0,17%, como se demuestra a través del levantamiento altimétrico realizado, con base en la estación E2 (616311,32; 4162641,29); 297,35), cuyos datos y resultados se presentan en la Tabla Tabla 5.3.1.

Es decir, actualmente el agua circula en sentido contrario a la Rambla Biznaga con una pendiente superior a la que tenía al ser construido y en sentido contrario. Lo que indica, que el extremo NO del canal ha sufrido un descenso relativo de casi 60 cm desde que fue construido, suponiendo que se construyera con una pendiente del 0,1%. En la Figura 5.3.7 se localiza el canal en la cartografía de SITMURCIA, respecto a la Rambla Biznaga.

Tabla 5.3.1: Datos y resultados del levantamiento altrimétrico de la incidencia en canales IC-03. Ha: altura de aparato, Hp: altura de prisma, H: ángulo horizontal, V: ángulo vertical, Dr: distancia reducida, inZ: incremento de cota, Z: cota

PUNTO	Ha	Hp	H	V	Dr	inZ	Z
							297,35
1	1,565	1,600	58,1790	100,0705	69,19	-0,11	297,24
2	1,565	1,600	0,1615	100,1135	71,00	-0,16	297,19
3	1,565	1,600	366,5490	100,1440	118,59	-0,30	297,05
4	1,565	1,600	350,3375	100,1390	204,87	-0,48	296,87
<hr/>							
Longitud	224,04						
Desnivel	-0,37						
Pendiente	-0,0017						

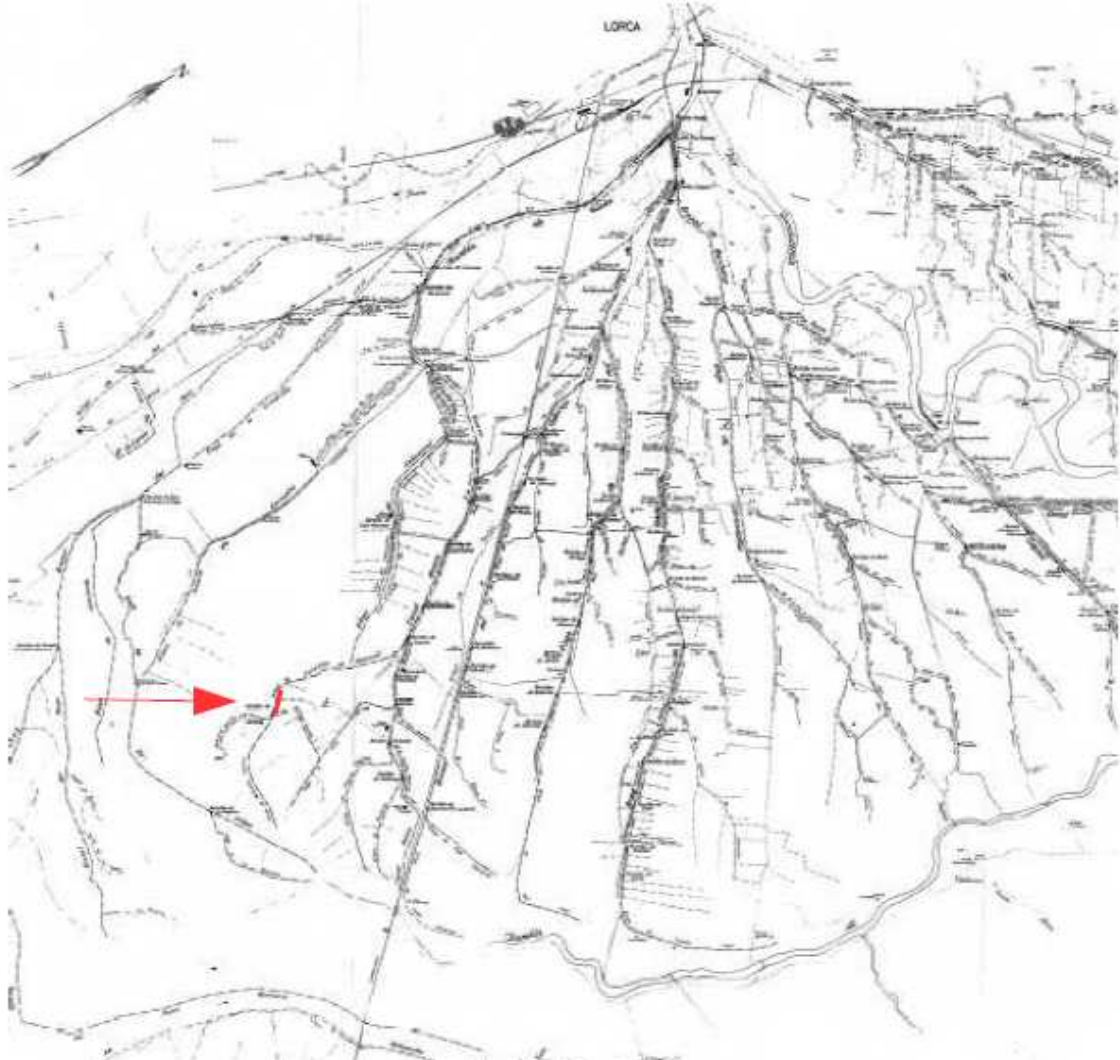


Figura 5.3.7: Vista parcial del mapa del riego tradicional en la ciudad de Lorca con ubicación relativa del canal de incidencia IC-03 (en rojo) Fuente: adaptada de Agrupación Cultural Lorquina



Figura 5.3.8: Localización de IC-03 sobre cartografía de SITMURCIA, identificado el punto SE del mismo y con posición relativa respecto a Rambla Biznaga (en azul oscuro). Adaptada de SITMURCIA.

Y en la figura Figura 5.3.9 se aprecia el detalle de la planta del canal con indicación de los puntos inicial y final, la base de levantamiento (E2) y los sentidos de las pendientes, original (en rojo) y actual (en azul).





Figura 5.3.9: Detalle de planta de canal de incidencia IC-03 sobre cartografía SITMURCIA. Con indicación de pendiente original (rojo) y pendiente actual (azul).

- Resultados de otras incidencias en canales en la pedanía de Campillo.

Se ha identificado como incidencia **IC-04** al actual camino de la Parada, que era un brazal de riego y de desagüe hacia la Rambla Biznaga (Figura 5.3.10). Hacia 1990 se invirtió la pendiente y dejó de desaguar hacia la misma a partir de cierto punto, por lo que se abandonó, y en las obras de modernización de mediados de los 90 se convirtió en un camino. Ver ficha de datos básicos en Figura 5.3.11 y resumen en FICHA Nº 18 del ANEXO.



Figura 5.3.10: Actual Camino de la Parada (en rojo), antiguo brazal que desaguaba en uno de los cauces naturales de la llanura de inundación de la Rambla Biznaga (en azul). Adaptada de SITMURCIA.

CATEGORÍA	Incidencias en canales	
DESCRIPCIÓN	Disminución de la pendiente en un canal de riego que acabó convertido en camino	
IDENTIFICACIÓN	<b>IC-04</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Campillo	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,609098 N	1,704431 W
COORDENADAS TM	X	Y
	614351	4163233

Figura 5.3.11: Ficha de datos básicos de la patología IC-04.

La incidencia **IC-05** corresponde a un antiguo riego o brazal, muy próximo al canal de incidencia **IC-03** y sobre el que éste discurre paralelo (ficha de datos básicos en Figura 5.3.12, resumen en FICHA Nº 19 del ANEXO e imagen en Figura

5.3.13) dejó de usarse como tal debido a la inversión de la pendiente. Antiguamente el agua circulaba directamente por la solera del brazal, posteriormente se construyó un canalillo elevado en el margen, que también se terminó inutilizando y fue retirado, y actualmente ya no se usa como riego y se ha dragado el fondo para que pueda desaguar hasta la rambla cuando hay inundaciones (Figura 5.3.14).

<b>CATEGORÍA</b>	<b>Incidencias en canales</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Disminución de la pendiente en un canal de riego que ya sólo sirve para desaguar a la rambla	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>IC-05</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,603303 N	1,681728 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616364	4162619

Figura 5.3.12: Ficha de datos básicos de incidencia en canales IC-05.





Figura 5.3.13: Canal de incidencia IC-05 visto desde aguas abajo hacia aguas arriba. La flecha roja indica el sentido de la pendiente hacia la rambla. La línea azul la posición del canalillo que se instaló cuando la pendiente del canal fue insuficiente y que posteriormente también cayó en desuso y fue eliminado.

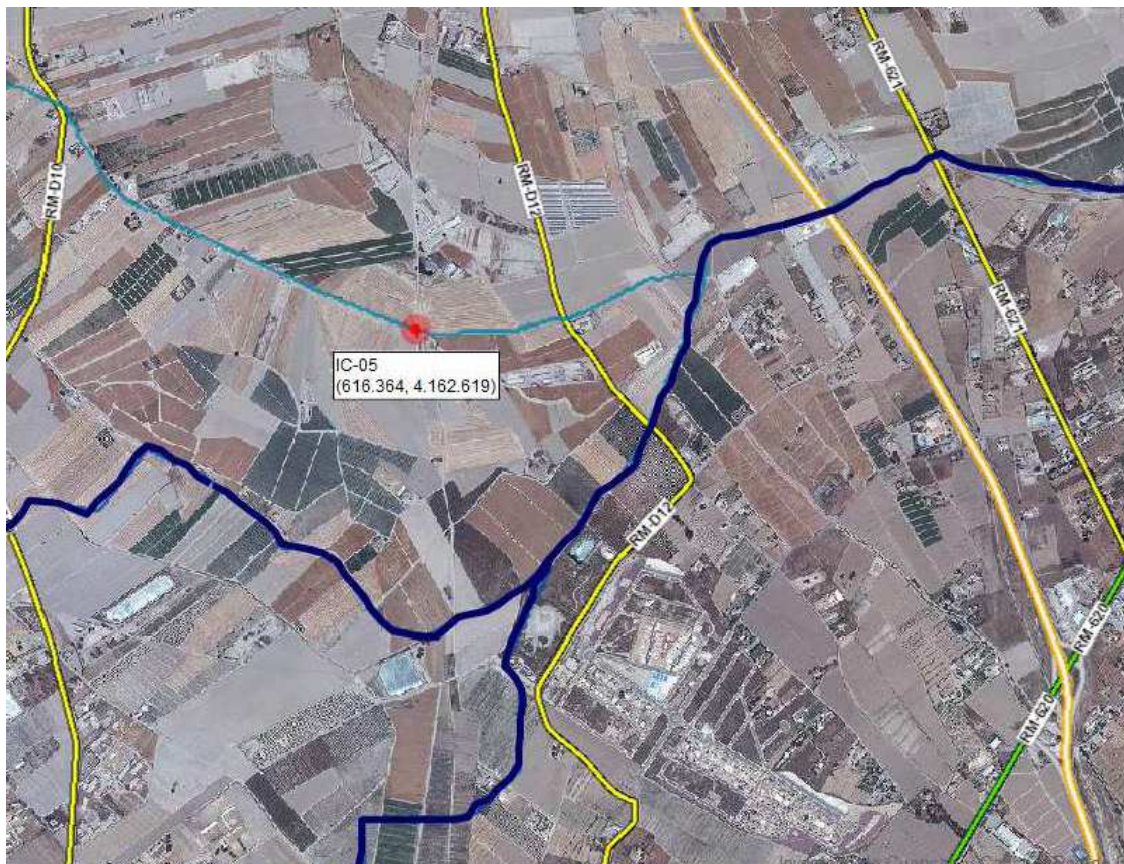


Figura 5.3.14: Localización cartográfica de la incidencia IC-05 (punto en rojo y trazado en azul claro), respecto a la Rambla Biznaga (en azul oscuro) en la que desagua actualmente. Adaptada de SITMURCIA.

Las incidencias **IC-04 e IC-05** han sido atestiguadas por el actual jefe de obras de la Comunidad de Regantes de Lorca que realiza su labor desde finales de la década de 1980.

Asegurando, además, que desde principios de los años 90, una vez al año, en los riegos de la pedanía de Campillo debían elevar periódicamente algunos tramos de los canalillos de riego que discurrían paralelos a los antiguos brazales, utilizando, unos sistemas de gatos hidráulicos, a fin de dotarlos de la pendiente necesaria para la circulación del agua.

Del estudio y análisis de todas las incidencias **IC-03, IC-04 e IC-05**, se deduce que existe correlación entre los datos de subsidencia (Figura 5.3.15) y las



anomalías detectadas en los sistemas de riego de la pedanía de Campillo, en la que aún no se han realizado las obras de modernización de regadíos que se han efectuado en otras pedanías de regadío. Todo ello, coincidiendo con cambios superficiales experimentado en el terreno detectados corroborados por los datos InSAR.

Queda demostrado que la incidencia **IC-01** no tiene relación con el fenómeno de subsidencia en el Alto Guadalentín, y no son concluyentes los resultados de la incidencia **IC-02**, aunque podrían estar causadas por subsidencia.

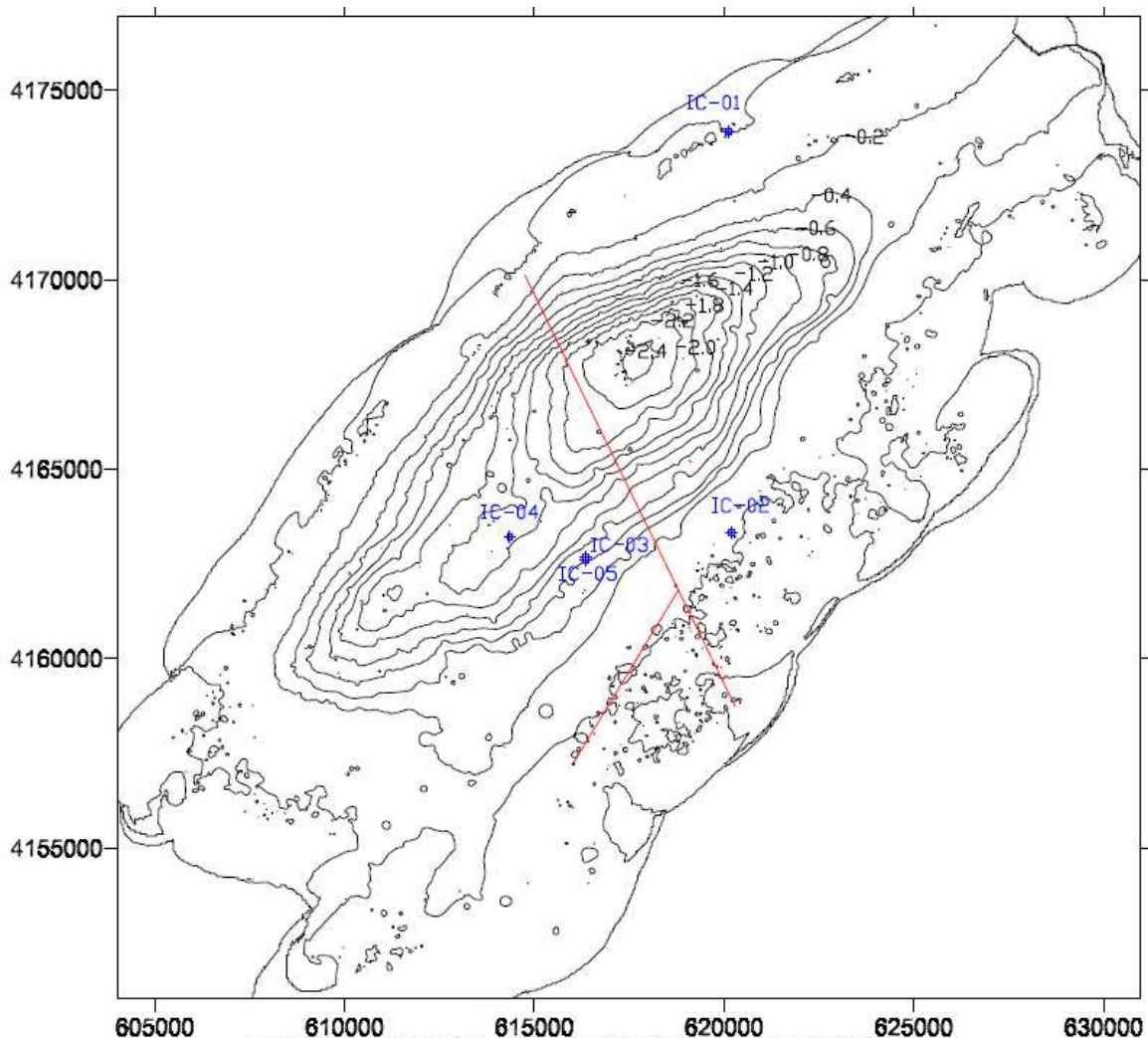


Figura 5.3.15: Localización de las incidencias en canales, de IC-01 a IC-05, en la cartografía de isolíneas de subsidencia, con indicación de los valores medios de hundimiento en el periodo 1992-2012. En rojo y como referencia los tramos rectos de la RM-621 (Lorca-Águilas) y cruce con la RM-620 (hacia Pulpí).

#### 5.4. Correlación entre datos InSAR e incidencias en el terreno

- Incidencias en el terreno (hundimientos, grietas, etc.).

En este apartado se presentan y se analizan los resultados de las incidencias detectadas en el terreno, como consecuencia de la subsidencia, que se refieren tanto a inversión de la pendiente de parcelas y bancales, respecto a la pendiente original, como a grietas aparecidas en el terreno.

La primera incidencia que se presenta, identificada como **IT-01**, muestra una parcela en la pedanía de Cazalla, plantada por árboles cítricos desde 1970. (Ver ficha de datos básicos en Figura 5.4.1 y resumen en FICHA Nº 20 del ANEXO).

Está situada en zona de subsidencia (-2,10 m) y distorsión altas (0.000667) (Figura 5.4.16) con pendiente de la misma en sentido contrario al de la topografía natural del terreno (Figura 5.4.3).

Los terrenos de alrededor se labran y nivelan anualmente, por lo que no se aprecia ninguna incidencia, pero esta parcela (Figura 5.4.2) no ha sufrido ningún tipo de nivelación mecánica, al estar plantada de árboles frutales, por lo que el hundimiento del terreno con inversión de la pendiente sólo se puede deber a la subsidencia.

CATEGORÍA	Hundimientos y grietas en el terreno	
DESCRIPCIÓN	Cambio de pendiente del terreno de una parcela	
IDENTIFICACIÓN	<b>IT-01</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Cazalla	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,639717 N	1,661240 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	618115	4166685

Figura 5.4.1: Ficha de datos básicos de incidencia IT-01.

La incidencia ha sido detectada por el dueño de la parcela durante los últimos años, al advertir que cada año tenía más dificultades para su riego por el sistema tradicional, pues el agua tendía a embalsarse en la parte norte de la misma, cuando la pendiente natural del terreno había sido descendente de NO a SE.



Figura 5.4.2: Imagen de parcela de incidencia IT-01. Parcela vista desde SO a NE. Lado SE en rojo

Para simplificar se ha considerado que la parcela es rectangular de lados 26 y 7 m respectivamente (medidos en cartografía SITMURCIA y comprobados en campo con cinta métrica), con dirección del lado menor NO-SE, perpendicular a las isolíneas de subsidencia. Inicialmente la pendiente de la parcela era descendente de NO a SE siguiendo la topografía natural del terreno, pero como queda demostrado con el levantamiento altimétrico de la Tabla 5.4.1 la pendiente se ha invertido de forma que, actualmente la parte NO está a menor cota que la parte SE de la parcela.

Tabla 5.4.1: Datos y resultados del levantamiento altimétrico de la parcela de incidencia IT-01. Ha: altura de aparato, Hp: altura de prisma, H: ángulo horizontal, V: ángulo vertical, Dr: distancia reducida, inZ: incremento de cota, Z: cota.

ESTACIÓN	PUNTO	Ha	Hp	H	V	Dr	inZ	Z
E1								301,000
	1	1,550	2,150	372,2445	98,5215	37,68	0,275	301,275
	2	1,550	2,150	378,8855	98,7675	43,31	0,239	301,239
	3	1,550	2,150	17,7945	98,5215	37,13	0,262	301,262
	4	1,550	2,150	15,2180	98,6830	42,03	0,270	301,270
	5	1,550	2,150	0,5490	98,3370	35,21	0,320	301,320
	6	1,550	2,150	0,5540	98,6460	41,79	0,289	301,289
	7	1,550	2,150	386,2050	98,3280	35,62	0,336	301,336
	8	1,550	2,150	386,6730	98,6420	41,28	0,281	301,281
	Pendiente							
	1-2	-0,0026						
	Pendiente							
	3-4	0,0005						
	Pendiente							
	5-6	-0,0022						
	Pendiente							
	7-8	-0,0038						
	Pendiente							
	1-4	-0,02051						

Como podemos observar existe correlación entre las pendiente, en sentido contrario al de la pendiente natural del terreno original que drena hacia la Rambla Biznaga (Figura 5.4.3), y los datos de distorsión detectados en las aproximaciones preliminares del IGME, que oscilan entre 0,000307 y 0,003860033.

En la Figura 5.4.4 se muestra el detalle de la parcela en la cartografía de SITMURCIA, con indicación de los puntos del levantamiento altimétrico.





Figura 5.4.3: Localización de incidencia IT-01, en cartografía SITMURCIA, respecto a Rambla Biznaga (en azul a la derecha de la imagen). Fuente: adaptada de SITMURCIA.



Figura 5.4.4: Parcela de incidencia IT-01 con indicación de los puntos del levantamiento altimétrico. Adaptada de SIMURCIA.

En la Figura 5.4.5 observamos una imagen de la que se ha identificado como incidencia **IT-02**, que al igual que la anterior, se trata de una inversión en la pendiente natural del terreno, sólo que en esta ocasión se encuentra en la pedanía de Campillo (ver datos básicos en la Figura 5.4.6 y resumen en FICHA Nº 21 del ANEXO). Esta incidencia está localizada junto a la incidencia **IC-03**.



Figura 5.4.5: Imagen de la incidencia IT-02, con parcela a la izquierda y elevación del canal. La flecha roja indica canal elevado, la flecha azul canal semienterrado.

<b>CATEGORÍA</b>	Hundimientos y grietas en el terreno	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Cambio de pendiente del terreno de una parcela	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>IT-02</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,603965 N	1.680561 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616466	4162694

Figura 5.4.6: Ficha de datos básicos de la incidencia IT-02.

Esta parcela tenía originariamente pendiente descendente de Oeste a Este en sentido hacia la Rambla Biznaga (Figura 5.4.8)

Actualmente se riega por goteo, aunque también se puede regar por el canal de la imagen, que fue afectado por la riada de 2012 y tuvo que ser reconstruido con el sentido original de la pendiente (aguas abajo hacia la rambla), funcionando, por tato en el sentido lógico, pero para ello se ha tenido que elevar unos 30 cm en la zona de aguas arriba, mientras que está prácticamente enterrado otros 30 cm en la de aguas abajo (Figura 5.3.6).

Como se demuestra en el levantamiento altimétrico de la Tabla 5.4.2 la pendiente actual de la parcela es a la inversa que la original, mientras que la del canal va en el sentido original. Para simplificar se ha considerado que la parcela es rectangular de 285 m de largo y 35 m de ancho, y la longitud del canal 307 m, aunque la geometría real se puede apreciar en la Figura 5.4.7, en la que se indica la base del levantamiento altimétrico, los puntos del levantamiento y el sentido de las pendientes actuales de canal y parcela.

En la Figura 5.4.16 podemos observar la localización de la parcela respecto a la cartografía de isolíneas de subsidencia, en zona de subsidencia media (-0,65 m) y distorsión alta (0,000556), lo que, sin duda, puede justificar el fenómeno.



Tabla 5.4.2: Datos y resultados del levantamiento altimétrico de la parcela de incidencia IT-01. Ha: altura de aparato, Hp: altura de prisma, H: ángulo horizontal, V: ángulo vertical, Dr: distancia reducida, inZ: incremento de cota, Z: cota

ESTACIÓN	PUNTO	Ha	Hp	H	V	Dr	inZ		Z
E3									296,00
	Canal								
	1	1,530	1,600	266,5655	99,7785	99,08	0,275	-153,4345	296,27
	2	1,530	1,600	175,7350	99,6255	45,70	0,199	-244,2650	296,20
	3	1,530	1,600	124,6700	99,8515	99,82	0,163	-295,3300	296,16
	4	1,530	1,600	109,4720	99,9455	200,71	0,102	-310,5280	296,10
	Parcela								
	5	1,530	1,600	267,9840	100,0735	99,08	-0,184	-152,0160	295,82
	6	1,530	1,600	107,8867	99,9815	212,16	-0,008	-312,1133	295,99
	7	1,530	1,600	291,3240	100,1010	88,32	-0,210	-128,6760	295,79
	8	1,530	1,600	94,4700	99,9805	178,67	-0,015	-325,5300	295,98
	Pendiente canal (4-1))	0,00056							
	Pendiente 6-5	-0,00062							
	Pendiente 8-7	-0,00068							



Figura 5.4.7: Cartografía SITMURCIA de la parcela y canal (en azul) de incidencia IT-02, conindicación de los puntos del levantamiento altimétrico y sentido de las pendientes de canal (azul) y parcela (rojo). Adaptada de SITMURCIA.



Figura 5.4.8: Posición relativa de parcela y canal de incidencia IT-02, respecto a IC-03 (izquierda) y Rambla Biznaga (derecha de la imagen, en azul). Adaptada de SITMURCIA.

A continuación se muestran los resultados de la que se ha llamado **IT-03**, que se corresponde con una gran grieta en el terreno que se hizo visible en la pedanía de El Esparragal, en Puerto Lumbreras, tras las intensas lluvias del 28 de septiembre de 2012.

Este caso no está exento de controversia en cuanto a las causas de la misma, entre las que se contempla “piping” y por supuesto subsidencia.

En la Figura 5.4.9 podemos comprobar la ficha de datos básicos, el resumen en la FICHA Nº 22 del ANEXO, y en la Figura 5.4.10 una vista aérea de uno de los tramos de la grieta, que llegó a tener una longitud de 1,5 km y una profundidad media superior a 3 m, y en algunos tramos a 5 m.

<b>CATEGORÍA</b>	Hundimientos y grietas en el terreno	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grieta en el terreno en El Esparragal	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>IT-03</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de El Esparragal (Puerto Lumbreras)	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,580380 N	1.725419 W
	37,579508 N	1,725419 W
	37,577913 N	1,724486 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	612542	4160023
	612543	4159926
	612628	4159750

Figura 5.4.9: Ficha de datos básicos de incidencia IT-03. Grieta en El Esparragal.



Figura 5.4.10: Vista aérea de un tramo de la grieta de incidencia IT-03. Fuente: laopiniondemurcia.es

En la figura Figura 5.4.11 se puede apreciar una vista de la grieta más de cerca y en la Figura 5.4.12 una representación de la traza de la grieta georreferenciada en Google Earth.





Figura 5.4.11: Detalle de la grieta de El Esparragal pasando por debajo de un muro de cerramiento de parcela. Fuente: laverdad.es



Figura 5.4.12: Trazo de la grieta de El Esparragal representada en Google Earth. Fuente: Google Earth.

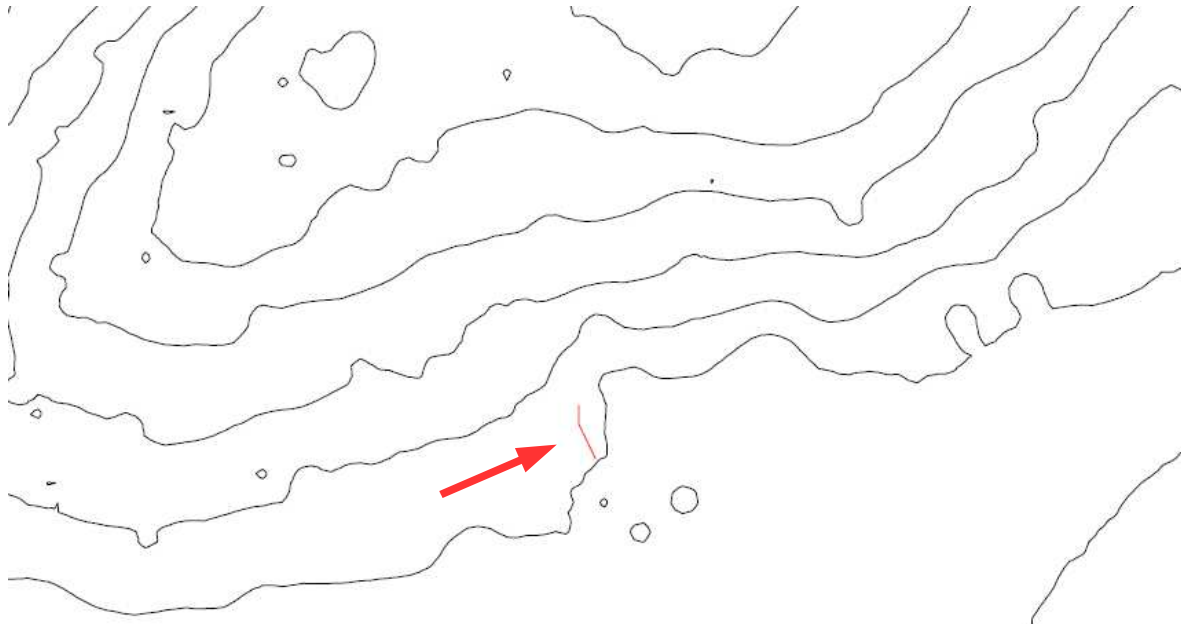


Figura 5.4.13: Posición relativa de la grieta de El Esparragal (IT-03) respecto al mapa de isolíneas de subsidencia

En la Figura 5.4.13 se puede ver la traza de la grieta en relación a las isolíneas de subsidencia, y en la Figura 5.4.16 la localización de la misma respecto a las isolíneas y el resto de incidencias del terreno. Por una parte nos encontramos que la traza es perpendicular al conjunto principal de isolíneas, pero por otra parte observamos que es sensiblemente paralela a las isolíneas de borde de cuenca, que indican los valores de subsidencia más bajos, lo que unido al hecho de encontrarse en el límite de cuenca y en zona de distorsiones altas, contribuye a la idea de considerar que la grieta es consecuencia de la subsidencia que se está produciendo en el valle, de forma similar a lo que ocurre en lugares como Arizona, ya que las características son muy similares en profundidad, ancho y morfología a la documentadas allí, aunque sería necesario un estudio más exhaustivo, quizá en una línea de investigación futura, para poder descartar otras hipótesis y dar una confirmación definitiva.

Respecto al hecho de que la grieta se manifestara tras las inundaciones de septiembre de 2012, motivo por el cual también se ha atribuido la grieta al fenómeno de "piping", cabe destacar que, como también está documentado que

ocurre en Arizona, es lógico que el agua destape este tipo de grietas, pero no es la causa de su origen, ya que la topografía de la zona atravesada no justifica que lleve esa dirección. Además del hecho de que las grietas ya existían antes, como lo demuestran las declaraciones de los responsables de municipio: "El alcalde de Puerto Lumbreras afirma que ya apareció una fisura similar hace diez años", y los vecinos de la zona, que tienen constancia de ese tipo de grietas que se "marcan" en el terreno desde hace décadas, por lo que ya había indicios de la grieta que, aunque no tan evidente, presentaba cierto hundimiento longitudinal del terreno, que en la zona denominan "quebrás" ("quebradas").

Aunque he hicieron todo tipo de esfuerzos para taparla, con una simple inspección visual se observa que todavía queda muy clara la traza de la grieta, y en algunos pequeños tramos se ha vuelto a abrir (Figura 5.4.14).



Figura 5.4.14: Imágenes del estado actual de la grieta de El Esparragal. A la derecha detalle de socavón. Al la izquierda se aprecia hundimiento en la traza de la grieta.



En este sentido, y para afianzar más, si cabe, la idea de la subsidencia como causa principal de este tipo de grietas, se menciona también el caso de la grieta aparecida en el polígono industrial "El Saladar", de Totana, por las mismas fechas que la de El Esparragal (otoño de 2012).

Para este trabajo de investigación no se disponen de datos precisos (ni coordenadas ni datos InSAR de esa parte de la cuenca) para el estudio y análisis de esta grieta, pero por las características de la misma, la localización aproximada y la dirección de la grieta, publicadas en los medios de comunicación, todo parece indicar que podría estar originada por subsidencia (Figura 5.4.15).



Figura 5.4.15: Imagen de la grieta aparecida en el polígono industrial "El Saladar" de Totana. Fuente: Villatri informaciones.

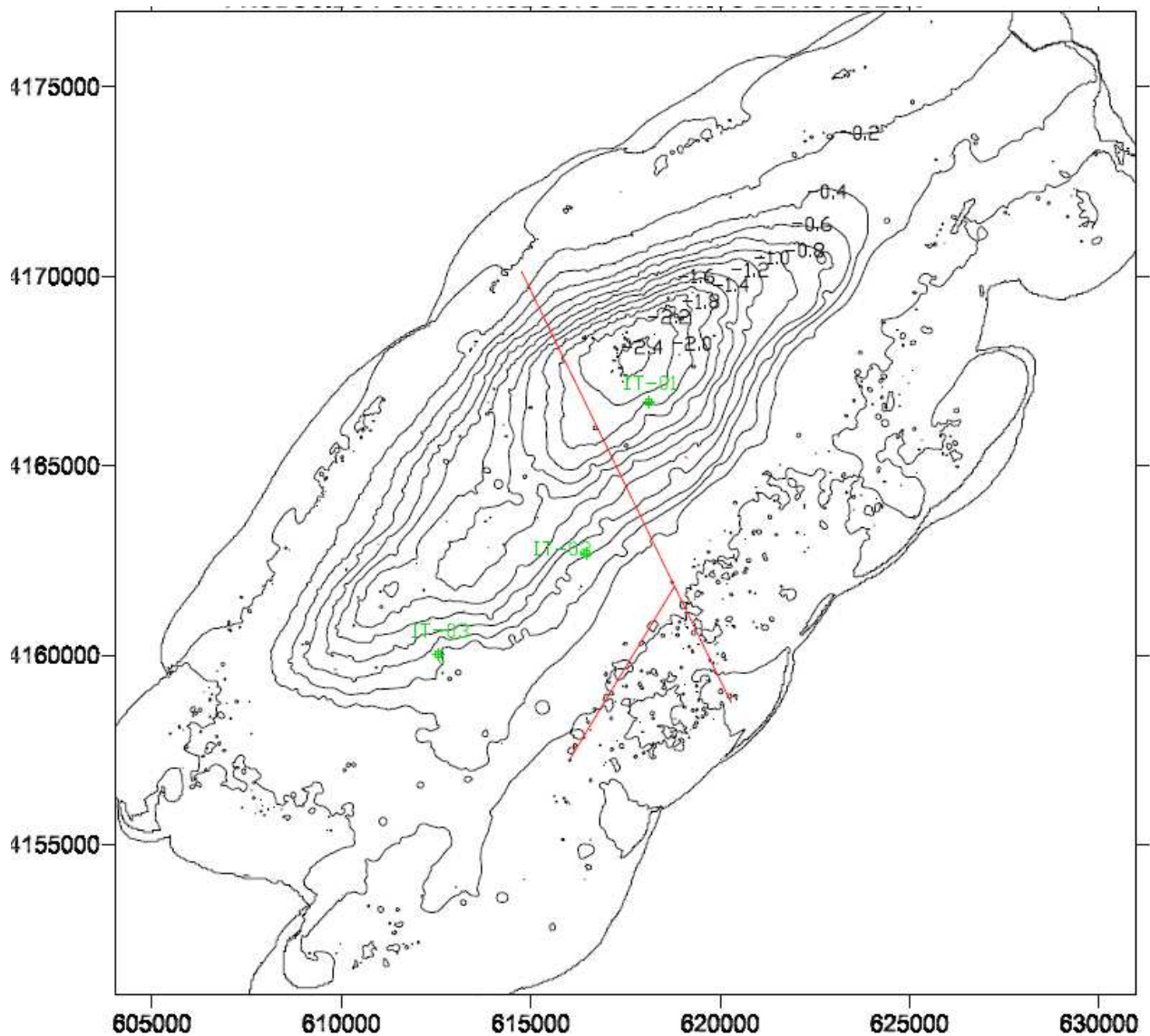


Figura 5.4.16: Localización de las incidencias en terreno, de IT-01 a IT-03, en la cartografía de isolíneas de subsidencia, con indicación de los valores medios de hundimiento en el periodo 1992-2012. En rojo y como referencia los tramos rectos de la RM-621 (Lorca-Águilas) y cruce con la RM-620 (hacia Pulpí).

## 5.5. Correlación entre datos InSAR y zonas de inundabilidad

- Resultados de la visita y toma de datos en las zonas con mayor cota de agua estancada en la riada del 28 de septiembre de 2012.

En la riada del 28 de septiembre de 2012 se inundaron zonas que no sufrieron los efectos de la riada de 1973, según declaraciones de varios vecinos.

Estas zonas coinciden con las zonas de mayor subsidencia detectada por InSAR en el periodo 1992-2012, que se encuentra situada al noroeste de la que hasta ahora era el cauce natural de drenaje de ese sector de la cuenca, la Rambla de Biznaga.

En la Figura 5.5.1 encontramos la ficha de datos básicos de una de las viviendas afectadas por la riada del 28 de septiembre de 2012, que se ha identificado como **ZI-01**, en la FICHA Nº 23 del ANEXO se puede consultar el resumen, y en la Figura 5.5.2 podemos observar una fotografía de la misma

CATEGORÍA	Zona Inundable afectada por subsidencia	
DESCRIPCIÓN	Vivienda en zona inundable	
IDENTIFICACIÓN	<b>ZI-01</b>	
LOCALIZACIÓN	Pedanía de Campillo	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud
	37,615996 N	1,677313 W
COORDENADAS UTM	X	Y
	616735	4164033

Figura 5.5.1: Ficha de datos básicos de la incidencia ZI-01. Fuente: elaboración propia.





Figura 5.5.2: Vivienda en Campillo afectada por la inundación del 28 de septiembre de 2012, que constituye la incidencia ZI-01. La línea roja indica el nivel máximo alcanzado por las aguas, más abajo se observan los restos de sedimentos que marcan el nivel durante el tiempo de encharcamiento.

El agua alcanzó una altura inicial de más de 3 m (marcada en rojo en la Figura 5.5.2). La marca inferior, en la que aún se aprecian los sedimentos adheridos a la fachada, se debe a que el agua estuvo estancada durante varias semanas, algo que también pudo estar influenciado por la barrera artificial que supone la Autovía Lorca-Águilas, hasta que fue drenada de forma artificial.

La vivienda localizada en las coordenadas indicadas en la ficha de datos básicos (Figura 5.5.1) se encuentra dentro del área denominada como zona inundable de origen fluvial de muy de alta probabilidad ( $T=10$  años) en la Figura 5.5.5.

En la Figura 5.5.3 se muestra la ficha descriptiva de otra vivienda afectada por la misma riada, situada muy cerca de la anterior (Figura 5.5.5) y que se ha

denominado **ZI-02**. El resumen de la incidencia se puede consultar en la FICHA Nº 24 del ANEXO.

<b>CATEGORÍA</b>	Zona Inundable afectada por subsidencia	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Vivienda en zona inundable	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>ZI-02</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,611963 N	1,687875 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	615807	4163573

Figura 5.5.3: Ficha de datos básicos de la incidencia ZI-02.

Como se puede observar en la fotografía (Figura 5.5.4) también se trata de una vivienda de nueva construcción, al igual que la anterior, lo que indica que en su momento no se tuvieron en cuenta los efectos de la subsidencia, cuando se concedieron las licencias de construcción de dichas viviendas.

Según los testimonios de vecinos de la pedanía y el jefe de obras de la Comunidad de Regantes de Lorca, la zona en la que se ubican ambas viviendas no se vio afectada por la gran riada de 1973, en la que el agua se drenaron por los canales de riego (brazales) y el cauce natural de la cuenca, la Rambla Biznaga. Sin embargo el fenómeno de subsidencia observado desde principios de los años 90 del siglo pasado que había provocado problemas y necesidades de actuaciones en canales de riego, no se tuvo en cuenta a efectos de considerar la peligrosidad de las zonas afectadas a efectos de inundabilidad.

En la Figura 5.5.6 observamos la localización relativa de ambas incidencias en la cartografía de isolíneas de subsidencia en una zona de subsidencia importante, y distorsión alta, que ha hecho que las áreas de inundabilidad se desplacen hacia el NO.



Figura 5.5.4: ZI-02. Vivienda de nueva construcción en Campillo afectada por la inundación del 28 de septiembre de 2012.

Los vecinos y agricultores de la zona tienen asumido que la llanura de inundación se ha trasladado unos 1500-2000 m hacia Lorca, alejándose de la Rambla Biznaga, ya que en la riada de septiembre de 2012 se inundaron zonas, en las que el agua estuvo estancada durante meses, que no se inundaron en 1973.

Varias viviendas se han visto afectadas. Una de ellas está abandonada desde ese momento y se aprecian todos los efectos del agua, marca del nivel que alcanzó y varios cm de sedimentos en los alrededores.

En 1973 la rambla drenó el agua de forma natural. Reordemos que la rambla discurre paralela al borde del área de subsidencia, y la zona actual de encharcamiento está más al norte coincidiendo con la zona de máxima subsidencia situada al oeste de la carretera de Águilas y la autovía, que han



actuado como barreras artificiales que han dificultado el drenaje, especialmente porque no contaban con obras de drenaje en esos puntos, al no haber sido necesarios con anterioridad.

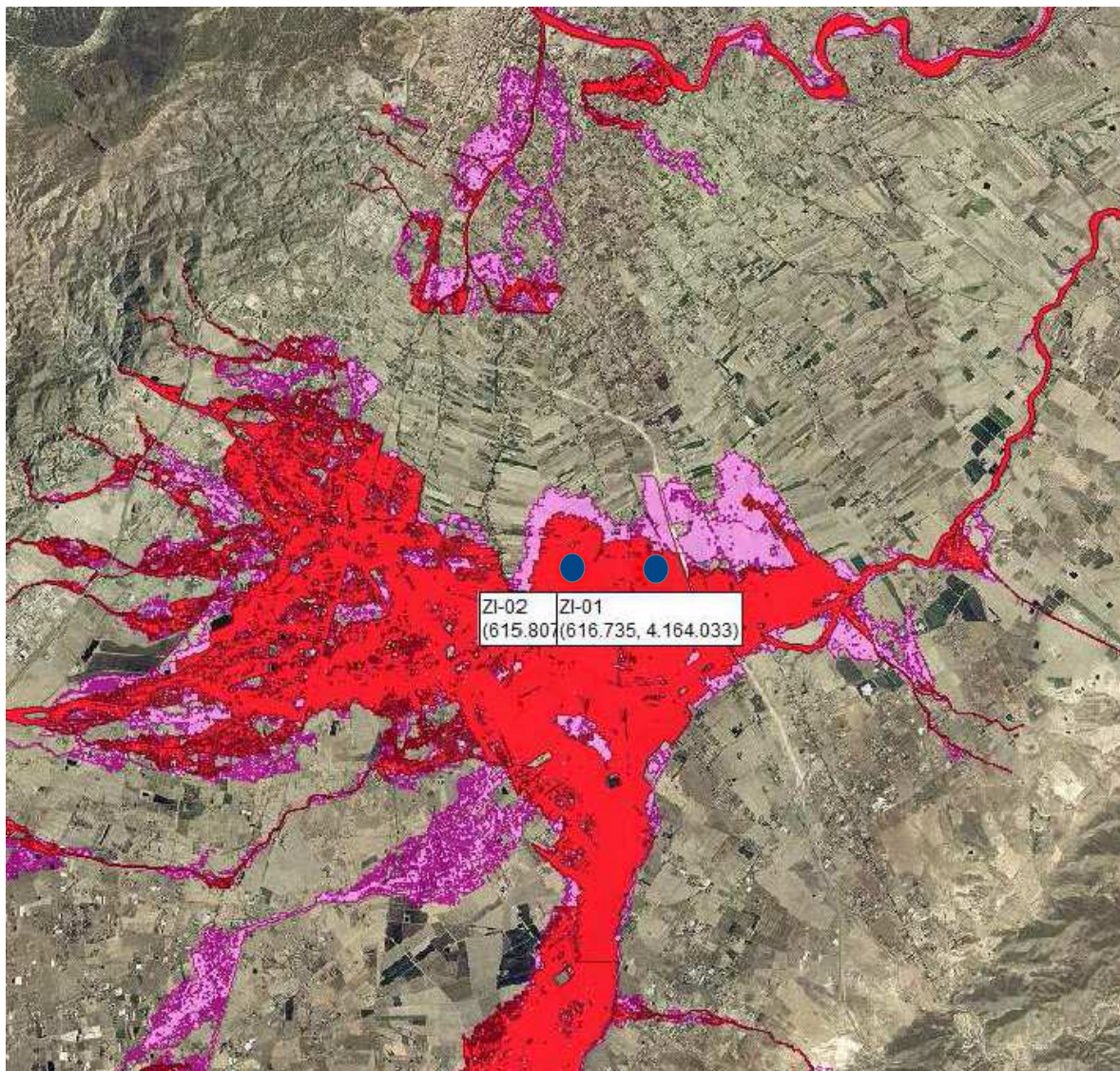


Figura 5.5.5: Localización de viviendas en Campillo, ZI-01 y ZI-02 sobre cartografía de riesgo de inundabilidad. En rojo las de muy alto riesgo (T=10 años) y en magenta las de alto riesgo (T=50 años). La Rambla Biznaga es el cauce que se observa en la parte central a la derecha y el Río Guadalentín en la parte superior. Adaptada de cartografía SITMURCIA

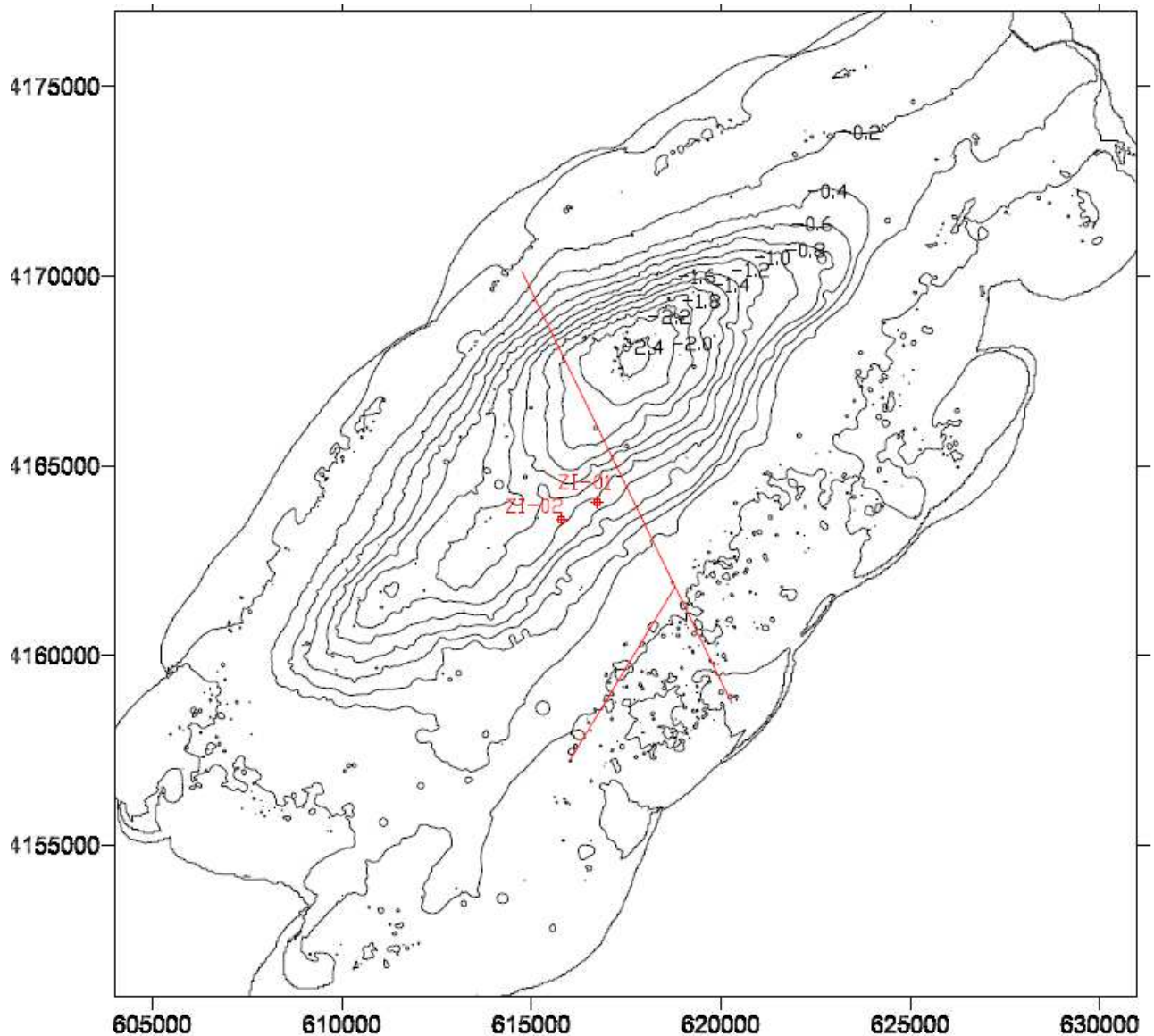


Figura 5.5.6: Localización de las incidencias en zonas de inundación, ZI-01 y ZI-02, en la cartografía de isolíneas de subsidencia, con indicación de los valores medios de hundimiento en el periodo 1992-2012. En rojo y como referencia los tramos rectos de la RM-621 (Lorca-Águilas) y cruce con la RM-620 (hacia Pulpí).



## **5.6. Análisis de consecuencias de la subsidencia en la zona**

A raíz de los resultados anteriores y en comparación con lo que ocurre en otros lugares como Murcia, México o Arizona, que sufren subsidencia causada por los mismos motivos que la estudiada en este trabajo, y a falta de un estudio más detallado y exhaustivo, se puede resumir que, hasta la fecha, las consecuencias de la subsidencia en la cuenca del Alto Guadalentín, si bien son evidentes, en general distan mucho de tener la gravedad, desde el punto de vista económico y de seguridad de las personas, que caracteriza los mencionados casos.

Como excepción cabría señalar que el mayor riesgo, y por lo tanto la consecuencia más negativa, de este fenómeno es el de inundabilidad de zonas que anteriormente estaban a salvo de dicho peligro, ya que éste sí puede ser causante de graves pérdidas, tanto económicas como personales, especialmente al tratarse de un riesgo que, por presentarse de forma intermitente, tanto las administraciones como los ciudadanos suelen subestimar.

En lo que respecta a las patologías en canales y construcciones, así como los usos del suelo, la gravedad de las consecuencias es mucho menor. No obstante se debería hacer un estudio y análisis a largo plazo del problema para tener una idea más precisa de la evolución de las consecuencias.

Como se ha comentado anteriormente, el hecho de que, en general, las consecuencias de la subsidencia en el valle no sean tan graves, se debe a la uniformidad de los asientos producidos, con distorsiones angulares muy bajas, en la mayoría de los casos compatibles con los estados límites de servicio de las estructuras, en gran parte debido a la gran profundidad a la que se está extrayendo el agua de los acuíferos, y al espesor y las características de los estratos de suelo blando compresible, en los que predominan las arenas y gravas.

En la Figura 5.6.1 se muestra la totalidad de las incidencias y patologías

estudiadas en este trabajo, localizadas en la cartografía de subsidencia, y podemos observar que exceptuando las incidencias en canales IC-01 y IC-02, que como ya se ha comentado la primera no está relacionada con la subsidencia, y la segunda podría estarlo pero los resultados no son concluyentes, y la incidencia en terreno IT-03, que por definición está justificado que se presente en los límites de la cuenca, el resto se localizan en zonas con una tasa de subsidencia alta o media y, sobre todo, con una distorsión alta o media, igualmente, como lo demuestra la proximidad de la isolíneas de subsidencia.

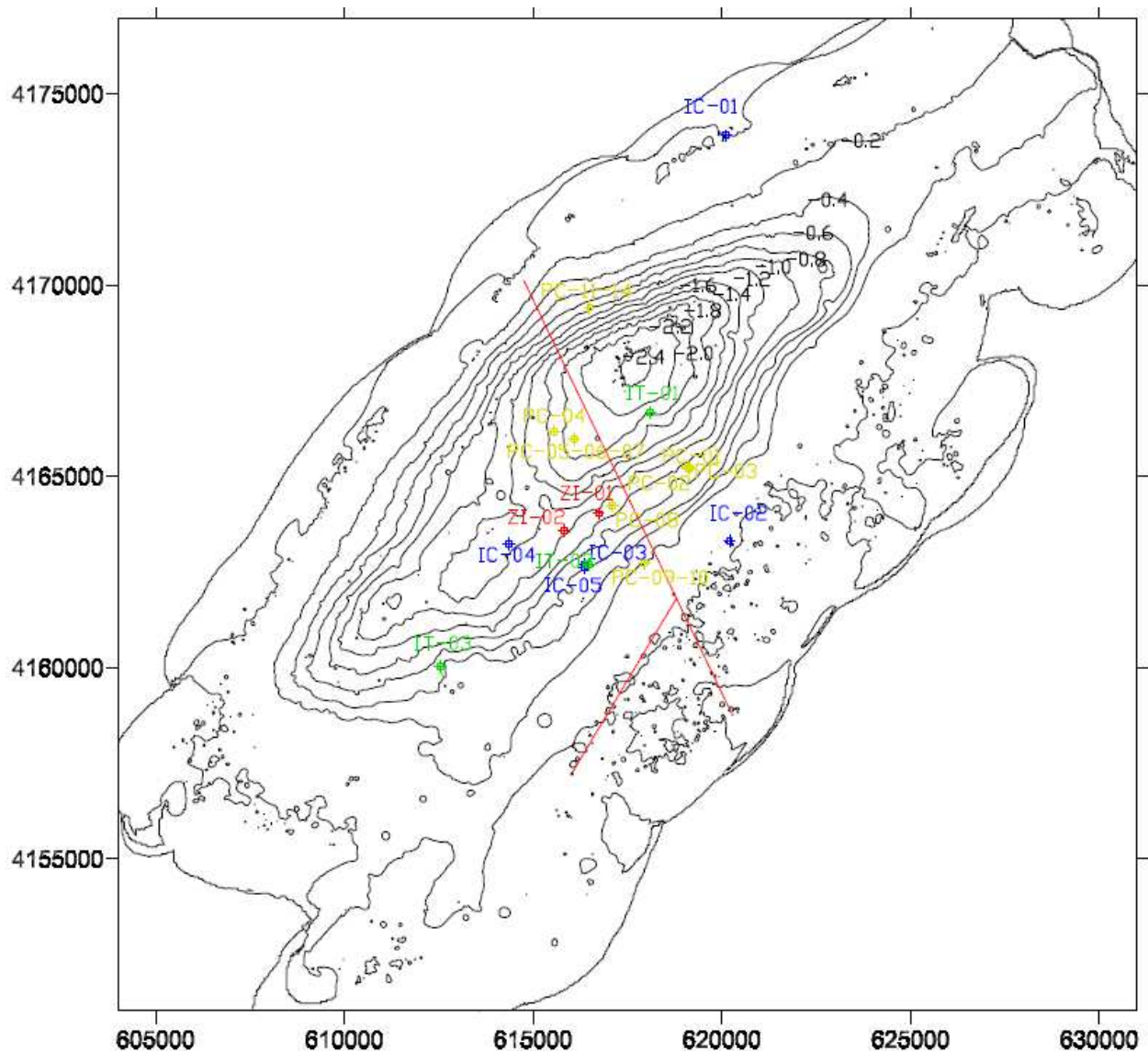


Figura 5.6.1: Localización de la totalidad de las incidencias y patologías estudiadas en la cartografía de isolíneas de subsidencia, con indicación de los valores medios de hundimiento en el periodo 1992-2012. En rojo y como referencia los tramos rectos de la RM-621 (Lorca-Águilas) y cruce con la RM-620 (hacia Pulpí).

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

## 6. CONCLUSIONES

Del estudio del marco teórico existente y de los datos extraídos de la Confederación Hidrográfica del Segura, queda demostrado que la masa de agua del Alto Guadalentín está sobreexplotada y que el descenso, de más de 100 m, experimentado en el nivel piezométrico, desde principios de la década de 1970, ha influido considerablemente en el fenómeno de subsidencia del terreno que se ha producido y sigue produciéndose en la zona, por lo que la subsidencia en la cuenca del Alto Guadalentín, como la de otros muchos lugares en el mundo, tiene como causa principal la sobreexplotación de acuíferos.

Del análisis de los datos preliminares InSAR y de la comparación con otros casos de subsidencia estudiados, se demuestra que la escasa incidencia de la subsidencia en patologías en las construcciones del Alto Guadalentín se debe a los siguientes motivos:

- Si bien los valores absolutos de descenso de la superficie del terreno son altos, las distorsiones angulares son bastante bajas, en la mayoría de los casos inferiores a los límites establecidos por normativa, y por lo tanto las deformaciones muy suaves, lo que puede deberse tanto a la gran extensión del área afectada, como a la gran profundidad (más de 100 m) a la que se encuentran los niveles piezométricos, contribuyendo ambas circunstancias a que la superficie del terreno se deforme de una manera más uniforme, en comparación con otros casos. También prodría influir la diferente composición del suelo, principalmente formado por arenas y gravas, respecto a Murcia, donde predominan los limos.

- La principal ciudad afectada, Lorca, se encuentra en los límites de la cuenca afectada por subsidencia, a diferencia de los casos de México y Murcia, que se encuentran en plena cuenca, sobre estratos compresibles de gran profundidad, por lo que las características de las viviendas de la zona afectada, principalmente viviendas unifamiliares de una o dos plantas y el carácter

diseminado de las construcciones contribuye a una menor incidencia y gravedad de los daños dificultando, además, la visibilidad.

A la vista de los resultados obtenidos en esta investigación, por primera vez se han comprobado y documentado consecuencias directas del fenómeno de la subsidencia en la cuenca del Alto Guadalentín, en forma de las incidencias y patologías que se enumeran a continuación:

- Se han detectado modificaciones significativas, incluso hasta llegar a la inversión completa, de las pendientes de canales de riego y parcelas de cultivo.
- Es evidente la formación de grietas en construcciones por desplazamiento y/o giro relativo de los elementos constructivos, como consecuencia asientos diferenciales por subsidencia.
- Se ha constatado la existencia de grandes grietas en el terreno y, a falta de un estudio exhaustivo que determine otra causa, los resultados obtenidos indican que pueden ser consecuencia de irregularidades topográficas en el substrato de la cuenca y de las grandes tracciones que se forman en los límites de la cuenca sometida a subsidencia, así como en las zonas de los depósitos aluviales compresibles.
- Se han producido importantes cambios geomorfológicos de la superficie de la cuenca que han alterado las zonas de inundabilidad, especialmente en la pedanía de Campillo, donde la zona de encharcamiento se ha desplazado unos 1500 m hacia el NO de la cuenca coincidiendo con los valores preliminares de subsidencia del terreno.



## **CAPÍTULO 7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

## **7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

En este trabajo se han detectado y documentado algunas incidencias y patologías provocadas por la subsidencia del terreno en la cuenca del Alto Guadalentín, sin embargo aún se está muy lejos de tener un registro amplio y detallado de las consecuencias del fenómeno en la cuenca, como sí existe en otros casos como México o Murcia, por lo tanto se propone, para el futuro, un estudio exhaustivo y un inventario de las consecuencias de la subsidencia en la zona de estudio, incluyendo una cuantificación económica de los daños ocasionados, así como la previsión para los próximos años.

Teniendo en cuenta la formación de nuevas zonas de inundabilidad es uno de los mayores riegos, hasta ahora detectados, como consecuencia de la subsidencia del terreno en la cuenca del Alto Guadalentín, también se propone como futura actividad la investigación de la evolución de la subsidencia en el valle a efectos de creación de nuevas zonas de inundabilidad y la elaboración de un mapa de riesgo.

Otra propuesta de línea de actuación para el futuro es la investigación y elaboración de un modelo geológico-geotécnico tridimensional que permita identificar los principales problemas geotécnicos y afinar la estimación de propiedades del suelo del valle del Guadalentín, así como para facilitar el estudio y evolución de la subsidencia en el mismo, a efectos tanto de caracterizar las distintas zonas de la cuenca en relación a los valores de subsidencia obtenidos mediante técnicas InSAR, como de relacionar los datos obtenidos con las variaciones de cota de los niveles piezométricos y con la profundidad de los estratos de suelo compresible.

Por último y como línea de actuación más concreta se propone también el estudio de las grietas de El Esparragal y del polígono "El Saladar" para confirmar definitivamente o descartar, en su caso, que se deben a la subsidencia. Y, en un

sentido más amplio, investigar si existen otras grietas, para lo cual se podrían emplear las modernas técnicas geofísicas que se han desarrollado en los últimos años, como el georradar, con las que se tendría la posibilidad de identificar y cartografiar grietas "ciegas" que no han llegado a manifestarse en la superficie.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAGI, T. (1992). "National contributions by TC12 land subsidence committee members Japan". Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Río de Janeiro, 5, 3205-3206.
- ANTÓN MERINO, A. (2014). *Monitorización de fenómenos geodinámicos aplicando técnicas GNSS*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- ARIZONA LAND SUBSIDENCE GROUP (2007). Land subsidence and earth fissures in Arizona.
- AVILÉS, J. Y PÉREZ ROCHA, L.E. (2010). Regional subsidence of Mexico City and its effects on seismic response, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30 , p. 981–989.
- BALLESTEROS, J.L (1995b). "Informe sobre daños en edificación". ASEMAS. Expediente nº 12/24.727/94.
- BALLESTEROS, J.L. (1994). "Informe sobre daños en los edificios Gaudí y Alfonso X de Murcia". ASEMAS.
- BALLESTEROS, J.L. (1995c). "Informe sobre daños en el edificio Constanza". ASEMAS. Plaza de Santoña, nº 3. Murcia.
- BALLESTEROS, J.L. (1995d). "Informe sobre daños en edificación". ASEMAS. C/. Sta. Joaquina de Vedruna, nº 3. Murcia.
- BALLESTEROS, J.L. (1995e). "Informe sobre daños en edificación". ASEMAS. Expediente nº 12/25.124/94.
- BALLESTEROS, J.L. (1995f). "Informe sobre los efectos derivados del rebajamiento del nivel freático en el casco urbano de Murcia". Centro de Asesoramiento Tecnológico. Colegio Oficial de Arquitectos de Murcia.
- BALLESTEROS, J.L. (1996a). "Informe sobre daños en edificación". ASEMAS. Expediente nº 12/27.043/95. Asegurado Srs. Víctor Bernal y Maestre Meroño. 50 viviendas de P.O., locales y sótano. C/. Vicente Aleixandre. Murcia.
- BATES, R. Y JACKSON, J. (1980). Glossary of Geology. Published by Amer Geological Inst. ISBN 10: 0913312150 ISBN 13: 9780913312155
- BONI, R. et alt. (2015, en revisión). "Multi-sensor advanced DInSAR

analysis of severe land subsidence: Alto Guadalentín Basin (Spain)" en *Engineering Geology*. Elsevier Editorial System.

- BOUWER, H. (1977). "Land subsidence and cracking due to ground-water depletion". *Ground Water*, 15, No. 5. 358-364.
- BUFORN, E., BEZZEGHOUD, M., UDÍAS, A. & PRO, C., (2004). Seismic Sources on the Iberia-African Plate Boundary and their Tectonic Implications. *Pure Appl. Geophys.* 161, 623 - 646, doi: 610.1007/s00024-00003-02466-00021.
- BUFORN, E., SANZ DE GALDEANO, C. & UDÍAS, A. (1995), Seismotectonics of the Ibero-Maghrebien region. *Tectonophysics* 248, 247-261
- CARBOGNIN, L. (1978). "Subsidenza e ambiente". *Atti del Convegno 'I Problemi della Subsidenza nella Politica del Territorio o della Difesa del Suolo'*, Pisa. 3-12.
- CARPENTER, M. C. (1999). Land subsidence in the United State: Circular 1182, U. S. Geological Survey. Galloway D., Jones D. R. e Ingebritsen S. E. eds. Part I, Mining Ground Water, South-Central Arizona. p. 65-81.
- CERÓN GARCÍA, J.C. (1997). *Hidrogeoquímica del acuífero del Alto Guadalentín (Murcia)*. Universidad de Granada.
- CHANG, C. C. (2000). "Estimates of horizontal displacements associated with the 1999 Taiwan earthquake". *Survey Review*, 35, (278): 563-568.
- CHS (2014). PLAN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL SEGURA 2009/2015.
- CHS (2015). DOCUMENTOS INICIALES CICLO DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA 2015–2021. DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA.
- CORAPCIOGLU, M.Y. (1984). "Land subsidence-a state-of-the-art review". 'Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media'. Nijhoff: Dordrecht. 369-444.
- CUSTODIO, E. Y LLAMAS, M.R. (1983). "Hidrología subterránea". 2nd edn. Barcelona. Omega.
- DÍAZ-RODRÍGUEZ, J.A. (2006). "Los suelos lacustres de la ciudad de México" en *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*.



Vol. 6(2) 111

- ECHEVERRÍA, A. et alt. (2012). "Deformación cortical de las Béticas Orientales observada mediante GPS y su relación con el terremoto de Lorca" en *Física de la Tierra*.
- FIGUEROA VEGA, G.E. (1977). "Subsidence of the City of Mexico, A Historical Review". *Publication No. 121 of The International Association of Hydrological Sciences*, pp. 35-38.
- FRONTERA GENOVARD, T. et alt. (2012). "Medidas de deformaciones cosísmicas con DInSAR para el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011" en *Física de la Tierra*.
- GALLOWAY, D.L., AND RILEY, F.S. (1999). "San Joaquin Valley, California Largest human alteration of the Earth's surface: in Land Subsidence in the United States", Galloway, D.L., Jones, D.R., and Ingebritsen, S.E., eds., U.S. Geological Survey Circular 1182, pp. 23-34, <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/>, accessed Feb. 13, 2009.
- GARCÍA-MONDÉJAR, J. et alt. (2014). "Relación entre sedimentación y tectónica neógeno-cuaternaria en el sector de Lorca" en *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 27(1).
- GEOTECNIA Y PROYECTOS (1995). "Estudio de las variaciones de los niveles freáticos en el subsuelo del casco urbano de Murcia. Consecuencias geotécnicas". G-166. Murcia.
- GONZÁLEZ MÉNDEZ, P.J. (2010). *Medida y caracterización de deformaciones usando técnicas geodésicas y de teledetección. Aplicación en volcanología y sismotectónica*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. CSIC.
- GONZÁLEZ VALLEJO et al. (2002). *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. Madrid.
- GONZÁLEZ, P.J. et alt. (2012). "The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading" en *Nature Geoscience*. DOI: 10.1038/NGEO1610.
- GONZÁLEZ, P.J.; FERNÁNDEZ, J. (2011). "Drought-driven transient aquifer

compaction imaged using multitemporal satellite radar interferometry" en *Geology*.  
DOI: 10.1130/G31900.1

- HERRERA, I. et al. (1977). "Development of artificial reservoirs by inducing land subsidence". 'Land Subsidence Symposium'. Int. Ass. Hydrological Sciences, Proc. 2nd Int. Symp. Land Subsidence, Anaheim. 39-45.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (1975). "Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Baja del Segura. Informe Técnico 5". El Valle del Guadalentín.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (1987). "Declaración provisional de acuífero sobreexplotado relativa al sistema acuífero del Valle del Guadalentín (Murcia)".
- ISHII, M. et al. (1977). "Recent tendencies of the land subsidence in Tokyo". 'Land Subsidence Symposium'. Int. Ass. Hydrological Sciences, Proc. 2nd Int. Symp. Land Subsidence, Anaheim. 25-34.
- JARAMILLO, A. (1997). "Dictamen sobre la causa de los daños y reparación del edificio de La Convalecencia, en C/. Luís Fuentes Pagán, nº 9, de Murcia".
- JARAMILLO, A. Y BALLESTEROS, J.L. (1997). "El descenso del nivel freático en Murcia: Influencia sobre los edificios". ASEMAS.
- JIMÉNEZ SALAS et al. (1980). "Geotecnia y Cimientos III". Editorial Rueda, Madrid.
- MAÑÁ, F. (1995). "Notas sobre las anomalías recientes que presentan algunos edificios de la ciudad de Murcia a tenor de la información suministrada por el Colegio de Arquitectos". Barcelona.
- MOLINERO HUGUET, J. (2005). Hidrogeología: tipos de acuíferos. Universidad de Santiago de Compostela.
- PACHECO MARTÍNEZ, J. (2007). *Modelo de subsidencia del valle de querétaro y predicción de agrietamientos superficiales*. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México.
- POLAND J. F. Y LOFGREN B. E. (1984); Case history 9.13: San Joaquin

Valley, California, U.S.A.: Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal, prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8.4, Joseph F. Poland Chairman and Editor, p. 263-278.

- POLAND, J.F. et alt. (1972). "Glossary of selected terms useful in studies of the mechanics of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal". U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2025. USGS, Wash. D.C.
- PROKOPOVICH, N.P. (1979). "Genetic classification on land subsidence". 'Evaluation and Prediction of Subsidence'. ASCE. 389-399.
- REAL DECRETO 594/2014, de 11 de julio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura.
- REAL DECRETO 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSR-02).
- RICCERI, G. Y FAVARETTI, M. (1992). "National contributions by TC12 land subsidence committee members Italy". Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech. and Fond. Eng., Río de Janeiro, 5. 3214-3216.
- RICCERI, G., Y BUTTERFIELD, R. (1974). "An analysis of compressibility data from a deep borehole in Venice". Géotechnique, 24.2. 175-191.
- RODRÍGUEZ ESTRELLA, T. (2012) <http://nuestra-tierra.laverdad.es/naturaleza/geologia/2730-la-sobreexplotacion-del-acuifero-del-guadalentin-no-causo-el-terremoto>
- RODRÍGUEZ ESTRELLA, T. et alt. (1996). "Posible relación de la tectónica actual distensiva con el alargamiento de los piping en el saladar de La Mata-Los Ventorrillos (Valle del Guadalentín, Murcia)". Papeles de Geografía, N." 23-24, 263-281.
- SCOTT, R.F. (1979). "Subsidence-a review". 'Evaluation and Prediction of Subsidence' ASCE. 1-25.
- SEDESOL-COREMI (2004). Guía metodológica para la elaboración de Atlas de peligros naturales a nivel de ciudad.
- SENENT, M. (1995). "Informe hidrogeológico sobre los efectos de la sequía en los edificios de la ciudad de Murcia". Universidad de Murcia. Instituto del Agua.

- SUAREZ, L. Y REGUEIRO, M. (1997). Guía ciudadana de los riesgos geológicos. The American Institute of Professional Geologists. Versión española. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España. Madrid.
- TERZAGHI, K. (1956,). Theoretical Soil Mechanics: New York, John Wiley and Sons, 528 p.
- TOMÁS JOVER, R. (2008) .*Estudio de la subsidencia de la ciudad de murcia mediante interferometría sar diferencial avanzada*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.
- TOMÁS JOVER, R. et al. (2004). "Diseño de un modelo geológico-geotécnico 3d de la Vega Baja del Río Segura (Alicante, SE España)". XVI CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GRÁFICA.
- TOMÁS JOVER, R. et al. (2009). "Subsidencia del terreno. Ground subsidence" en *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*.
- TRAPOTE JAUME, A. y JOVER SMET, M. (2014). "Pasado y presente de los viajes del agua a Lorca". Libro jubilar en homenaje al profesor Antonio Gil Olcina. Universidad de Alicante.
- TURRIÓN PELÁEZ, F. (2012). "Nuevas aportaciones al conocimiento hidrogeológico del valle del Guadalentín y su evolución en los últimos 30 años". <http://www.franciscoturrión.com/2012/12/el-acuífero-de-lorca-no-esta.html>.
- VÁZQUEZ CARRETERO, N.J. (2001). *Cálculo de la subsidencia unidimensional debida a los descensos del nivel piezométrico. Aplicación al casco urbano de murcia y a los efectos sobre sus edificios*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla.

## **ANEXO DE FICHAS RESUMEN DE INCIDENCIAS Y PATOLOGÍAS**


En este ANEXO se presentan un total de 24 fichas correspondientes a cada una de las incidencias y patologías estudiadas, en las que se resumen los datos principales de cada caso para tener una mejor perspectiva de cada uno de ellos.

Además de los datos de las fichas de datos básicos, que ya se han presentado en el capítulo de resultados, se han añadido otros datos como las fechas relevantes (construcción, aparición de incidencia o patología), información sobre si se han realizado actuaciones o no, valores de subsidencia, tanto de hundimiento como de distorsión de la zona donde se ha detectado cada caso, y características principales del objeto de la incidencia o patología y los detalles de estas últimas, además de información gráfica.

FICHA Nº 1		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones (PC).	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grietas en muro de arriostramiento de vivienda.	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	PC-01	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Cazalla	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,626464 N	1,650406 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	619092	4165228
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década 1970	Sin datos	Superficiales
CARACTERÍSTICAS		
Construcción de los años 70 mediante estructura de una planta y cámara, mediante muros de carga y de arriostramiento, de fábrica de ladrillo.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,90	0,000377 (media)
DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS		
Series de grietas principales a 45° en el muro exterior de arriostramiento, compatibles con asiento diferencial de la cimentación del mismo. El muro de arriostramiento afectado es perpendicular a las isolíneas de subsidencia en dirección SE-NO.		
DESCRIPCIÓN GRÁFICA		
		





<b>FICHA Nº 2</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones (PC).	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grieta vertical en muro de arriostramiento de vivienda.	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>PC-02</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Cazalla	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,626160 N	1,649936 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	619134	4165195
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década 1970	Sin datos	Superficiales
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Construcción de los años 70 con estructura de una planta y cámara, mediante muros de carga y de arriostramiento, de fábrica de ladrillo.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,90	0,000377 (media)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Grieta vertical en el centro del muro de arriostramiento, compatible con asientos diferenciales del terreno. El muro de arriostramiento afectado es perpendicular a las isolíneas de subsidencia en dirección SE-NO.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		

FICHA Nº 3		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones.	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grietas en muro de cerramiento de parcela.	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	PC-03	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Cazalla	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,626667 N	1,650278 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	619102	4165245
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 2000	Sin datos	Superficiales
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Muro de cerramiento de parcela mediante muro de fábrica de bloques sobre cimentación a base de zapata corrida de hormigón armado.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,90	0,000377 (media)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Serie grietas por asientos diferenciales aparecidas en un muro de cerramiento exterior de parcela mediante obra de fábrica de bloque. El muro de arriostramiento afectado es perpendicular a las isolíneas de subsidencia en dirección SE-NO.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		




<b>FICHA Nº 4</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Desplazamiento y giro en junta estructural de estructura de paso bajo RM-11	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>PC-04</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,603333 N	1,69027 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	615559	4166187
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 1990	Sin datos	No
<b>CARACTERÍSTICAS</b>		
Junta estructural entre estructura principal y muro de contención de terraplén, en estructura de paso inferior de RM-11, de hormigón armado.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-1,90	0,000491 (alta)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Se ha producido un desplazamiento en la base de 50 mm, mientras que en coronación supera los 150 mm. Teniendo en cuenta que la altura es de 5,50 m, supone una distorsión angular de 0,018. El plano en que se han producido desplazamiento y giro es perpendicular a las isolíneas de subsidencia en dirección SE-NO.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		

<b>FICHA Nº 5</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Giro relativo en juntas estructurales de estructura de paso bajo RM-11	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>PC-05</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37.633611 N	1684167 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616102	4165979
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 1990	Sin datos	No
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Junta estructural entre ambas partes de la estructura principal (lado SE, Águilas), en estructura de paso inferior de RM-11, de hormigón armado.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-2,22	0,000125 (baja)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
La junta presenta un desplazamiento de 35 mm en la base de la junta, que tiene una altura de 4 m, por lo tanto una distorsión de 0,00875		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		

<b>FICHA Nº 6</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Giro relativo en juntas estructurales de estructura de paso bajo RM-11	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>PC-06</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37.633611 N	1684167 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616102	4165979
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 1990	Sin datos	No
<b>CARACTERÍSTICAS</b>		
Junta estructural entre ambas partes de la estructura principal (lado NO, Lorca), en estructura de paso inferior de RM-11, de hormigón armado.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-2,22	0,000125 (baja)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
La junta, que tiene una altura de 4 m y presenta un desplazamiento de 50 mm en la base, por lo tanto una distorsión de 0,0125.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		




<b>FICHA Nº 7</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grieta a 45° en aleta de contención de terraplenes de estructura de paso bajo RM-11	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	PC-07	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,633611 N	1,684167 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616102	4165979
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 1990	Sin datos	No
<b>CARACTERÍSTICAS</b>		
Muro de contención (aleta) de hormigón armado en estructura de paso de RM-11.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-2,22	0,000125 (baja)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Se observa una grieta a 45° por arco de descarga, en una de las aletas de contención de terraplenes de la estructura. La grieta recorre el elemento de arriba a abajo, de derecha a izquierda. Este tipo de grietas no es común en estructuras de hormigón armado, lo que indica un importante asiento del terreno, que puede deberse a subsidencia.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		



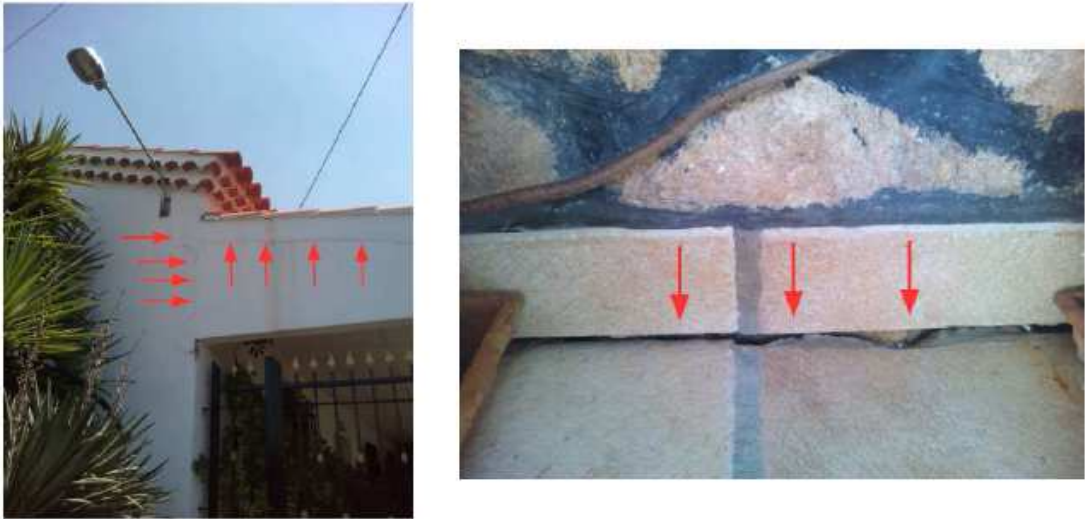
<b>FICHA Nº 8</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Desplazamiento relativo de elementos estructurales perpendiculares en junta estructural de estructura de paso bajo RM-11	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	PC-08	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,617778 N	1.673056 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	617107	416423
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 1990	Sin datos	No
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Junta estructural de encuentro entre estructura principal y muro de contención de terraplén en estructura de paso de RM-11.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-1,10	0,000434 (media)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Como se observa en la imagen se ha producido un desplazamiento relativo de dos elementos estructurales de hormigón armado perpendiculares de una junta estructural, lo que ha provocado la rotura de las aristas de los elementos. El desplazamiento observado es compatible con un asiento diferencial provocado por subsidencia, en función de la localización de la estructura.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		

FICHA Nº 9		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Giro relativo de elementos estructurales perpendiculares en juntas estructurales de estructura de paso bajo RM-11	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	PC-09	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,604217 N	1,663689.W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	617955	4162743
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 1990	Sin datos	No
CARATERÍSTICAS		
Junta estructural entre ambas partes de la estructura principal (lado NO, Lorca), en estructura de paso inferior de RM-11, de hormigón armado.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,20	0,000357 (media)
DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS		
Se trata de un desplazamiento, en la base de la junta estructural, de 15 mm, con lo que para una altura de 4,5 m resulta una distorsión de 0,0033. Esta junta tiene continuidad, a través de la solera y el tablero superior con la de la patología PC-10.		
DESCRIPCIÓN GRÁFICA		
		

<b>FICHA Nº 10</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Giro relativo de elementos estructurales perpendiculares en juntas estructurales de estructura de paso bajo RM-11	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>PC-10</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,604217 N	1,663689.W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	617955	4162743
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 1990	Sin datos	No
<b>CARACTERÍSTICAS</b>		
Junta estructural entre ambas partes de la estructura principal (lado SE, Águilas), en estructura de paso inferior de RM-11, de hormigón armado.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,2	0,000357 (media)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Se trata de un desplazamiento, en la base de la junta estructural, de 15 mm, con lo que para una altura de 4,5 m resulta una distorsión de 0,0033. Esta junta tiene continuidad, a través de la solera y el tablero superior con la de la patología PC-09.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		




<b>FICHA N° 11</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grietas y desnivel del solado en vivienda en la pedanía de Pulgara	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>PC-11</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Pulgara	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,664642.N	1,679148 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616496	4169428
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
1970	Mayo de 2011	Superficiales en grietas y varias reformas del solado.
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Vivienda con estructura de muros de carga y arriostramiento de fábrica de ladrillo sobre zapata corrida de hormigón en masa, combinada con estructura porticada de hormigón armado con cimentación mediante zapatas aisladas con arriostramiento.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,98	0,001 (alta)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Diversas grietas a 45° y horizontales en la mayor parte de los muros de carga y arriostramiento de la estructura, así como de la tabiquería. Desnivel del solado en la dirección y sentido de las isolíneas de subsidencia.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		

FICHA Nº 12		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grietas y asiento en porche de la vivienda de patología PC-11, en la pedanía de Pulgara	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	PC-12	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Pulgara	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,664642.N	1,679148 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616496	4169428
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
1990	Desde su construcción	Superficiales en grietas y varias reformas del solado.
CARACTERÍSTICAS		
Porche adosado a la vivienda de patología PC-11, mediante empotramiento de viguetas autorresistentes en muro de carga de vivienda y en viga sobre pilastras de obra de fábrica de ladrillo. Solera de hormigón en masa con mallazo, sobre terreno consolidado.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,98	0,001 (alta)
DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS		
Diversas grietas en el empotramiento del porche en la vivienda y en el solado del propio porche, que se ha separado del muro de carga de la vivienda, y que se ha inclinado en la dirección y sentido de evolución de las isolíneas de subsidencia. Las grietas aparecieron tras el terremoto de mayo de 2011 y han ido agravándose durante los últimos años.		
DESCRIPCIÓN GRÁFICA		
		



<b>FICHA Nº 13</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grietas en almacén de la vivienda de patología PC-11, en la pedanía de Pulgara	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	PC-13	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Pulgara	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,664642.N	1,679148 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616496	4169428
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
1997	Mayo 2011	No
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Almacén de la vivienda de patología PC-11, mediante obra de fábrica de ladrillo sobre somera cimentación superficial mediante zapata corrida.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,98	0,001 (alta)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Diversas grietas a 45°, horizontales y verticales en los muros del almacén.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		




<b>FICHA N° 14</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Patologías en construcciones	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grieta en vivienda de la pedanía de Pulgara	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>PC-14</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Pulgara	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,664642.N	1,679148 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616496	4169428
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 1970	2008 y mayo de 2011	No
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Vivienda con estructura de muros de carga y arriostramiento de fábrica de ladrillo sobre zapata corrida de hormigón en masa.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,98	0,001 (alta)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Grieta horizontal que apareció tras el terremoto de mayo de 2011 y que ha ido agravándose durante los últimos años.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		


<b>FICHA Nº 15</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Incidencias en canales	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Asiento en tramo del canal Trasvase Tajo-Segura	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>IC-01</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Tercia	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,704589	1,637330 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	620120	4173913
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década 1960	Sin datos	Recrecidos de cajeros
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Canal de hormigón armado, en lámina libre de sección trapezoidal.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	Despreciable	Despreciable
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Tramo del canal Trasvase Tajo-Segura, situado sobre obra de drenaje de rambla de la Sierra de Tercia, que ha necesitado de obras de recrecido de los cajeros del mismo a efectos de no perder sección útil, debido a los asientos en forma triangular con asiento máximo de 35 cm en el centro, coincidiendo con la vertical de la obra de drenaje: Las patologías aparecen tanto en los cajeros del tramo de canal, donde ha sido necesario realizar trabajos de recrecido, como en el pavimento de la vía de servicio, donde se observa tanto el hundimiento como el agrietamiento del firme. Se descarta que sea debido a subsidencia. El motivo es un mal funcionamiento de los terraplenes.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		



<b>FICHA Nº 16</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Incidencias en canales	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Cambios de pendiente, asientos y giros en canal	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	IC-02	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Aguaderas	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,609189N	1,638122 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	620204	4163328
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década 1960	Sin datos	No
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Canal secundario de riego, de hormigón.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	Despreciable	Despreciable
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Se comprueba que presenta deformaciones de hasta 50 mm en la pendiente de la solera, y que ha sufrido asientos y deformaciones en la alineación, así como giros respecto al plano vertical de la alineación. Al estar fuera del área de influencia de la subsidencia se considera poco probable que ésta sea la causa de las patologías.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		

FICHA Nº 17		
<b>CATEGORÍA</b>	Incidencias en canales	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Inversión de la pendiente en un canal de riego	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	IC-03	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,635556 N	1,682222 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616360 616155	4162690 4162782
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década 1980	Principios de década de 2000	No
CARACTERÍSTICAS		
Se trata de un canal trapezoidal de pequeña sección (30 cm de base inferior y altura, y 40 cm de base superior) y 224 m de longitud. Perpendicular a la Rambla Biznaga dirección NO-SE.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,78	0,000556 (alta)
DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS		
Originariamente se construyó siguiendo la pendiente natural del terreno, hacia la citada rambla sin embargo hace unos 15 años empezó a presentar problemas de pendiente hasta que resultó imposible el riego a través del mismo, ya que el agua se estancaba y no fluía en el sentido que lo había hecho hasta ese momento, por lo que el canal estuvo sin uso durante algunos años, hasta que el dueño tuvo la idea de probar a transportar el agua en sentido contrario, que es como se está usando en este momento, con mayor velocidad del agua que cuando funcionaba en el otro sentido, ya que la pendiente actual es de 0,17%.		
DESCRIPCIÓN GRÁFICA		
		




FICHA Nº 18		
<b>CATEGORÍA</b>	Incidencias en canales	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Disminución de la pendiente en un canal de riego que acabó convertido en camino	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	IC-04	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,609098 N	1,704431 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	614351	4163233
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Anterior a siglo XX	Década de 1990	Sí
CARACTERÍSTICAS		
Actual Camino de la Parada (en rojo), antiguo brazal que desaguaba en uno de los cauces naturales de la llanura de inundación de la Rambla Biznaga (en azul).		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	Entre -1,40 y -0,80	0,0006 (alta)
DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS		
Se ha identificado como incidencia IC-04 al actual camino de la Parada, que era un brazal de riego y de desagüe hacia la Rambla Biznaga. Hacia 1990 se invirtió la pendiente y dejó de desaguar hacia la misma a partir de cierto punto, por lo que se abandonó, y en las obras de modernización de mediados de los 90 se convirtió en un camino.		
DESCRIPCIÓN GRÁFICA		
		




<b>FICHA Nº 19</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Incidencias en canales	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Disminución de la pendiente en un canal de riego que actualmente sólo sirve para desaguar a la rambla	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	IC-05	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,603303 N	1,681728 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616364	4162619
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Anterior a siglo XX	Década de 1990	Sí
<b>CARACTERÍSTICAS</b>		
Antiguo riego o brazal muy próximo al canal de incidencia IC-03 y sobre el que éste discurre paralelo		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	Entre -0,60 y -0,80	0,000556 (alta)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
El canal dejó de usarse como tal debido a la inversión de la pendiente. Antiguamente el agua circulaba directamente por la solera del brazal, posteriormente se construyó un canalillo elevado en el margen (en azul), que también se terminó inutilizando y actualmente ya no se usa como riego y se ha dragado el fondo para que pueda desaguar hasta la rambla cuando hay inundaciones.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		


<b>FICHA N° 20</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Incidencias en el terreno	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Cambio de pendiente del terreno de una parcela	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>IT-01</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Cazalla	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,639717 N	1,661240 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	618115	4166685
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Década de 1970	Década de 2000	No
<b>CARACTERÍSTICAS</b>		
Parcela en la pedanía de Cazalla, plantada con árboles cítricos desde 1970		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-2,10	0,000667 (alta)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Está situada en zona de subsidencia y distorsión altas con pendiente de la misma del 0,17% en sentido contrario al de la topografía natural del terreno y por lo tanto a la pendiente original del canal.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		



FICHA Nº 21		
<b>CATEGORÍA</b>	Incidencias en el terreno	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Cambio de pendiente del terreno de una parcela	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	IT-02	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,603965 N	1.680561 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616466	4162694
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
Anterior a siglo XX	Década de 2000	Sí
CARATERÍSTICAS		
Se trata de una inversión en la pendiente natural del terreno, en la pedanía de Campillo. Para simplificar se ha considerado que la parcela es rectangular de 285 m de largo y 35 m de ancho, y la longitud del canal 307 m (geometría real en imagen). Esta incidencia está localizada junto a la incidencia IC-03.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,65	0,000556 (alta)
DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS		
<p>Esta parcela tenía originariamente pendiente descendente de Oeste a Este en sentido hacia la Rambla Biznaga, actualmente se riega por goteo, aunque también se puede regar por el canal de la imagen, que fue afectado por la riada de 2012 y tuvo que ser reconstruido con el sentido original de la pendiente (aguas abajo hacia la rambla), funcionando, por tato en el sentido lógico, pero para ello se ha tenido que elevar unos 30 cm en la zona de aguas arriba, mientras que está prácticamente enterrado otros 30 cm en la de aguas abajo</p> <p>Como se demuestra en el levantamiento altimétrico la pendiente actual de la parcela es a la inversa que la original, mientras que la del canal va en el sentido original. Se indican el sentido de las pendientes actuales de canal y parcela.</p>		
DESCRIPCIÓN GRÁFICA		
		

<b>FICHA N° 22</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Incidencias en el terreno	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Grieta en el terreno en El Esparragal	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>IT-03</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de El Esparragal (Puerto Lumbreras)	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,580380 N	1,725419 W
	37,579508 N	1,725419 W
	37,577913 N	1,724486 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	612542	4160023
	612543	4159926
	612628	4159750
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
No procede	Septiembre de 2012	Sí
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Gran grieta en el terreno que se hizo visible en la pedanía de El Esparragal, en Puerto Lumbreras, tras las intensas lluvias del 28 de septiembre de 2012.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-0,65	0,000556 (alta)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
Llegó a tener una longitud de 1,5 km y una profundidad media superior a 3 m, y en algunos tramos a 5. En cuanto a la traza de la grieta en relación a las isolíneas de subsidencia, por una parte nos encontramos que es perpendicular al conjunto principal de isolíneas, pero por otra parte es sesiblemente paralela a las isolíneas de borde de cuenca, que indican los valores de subsidencia más bajos, lo que unido al hecho de encontrarse en el límite de cuenca y en zona de distorsiones altas, contribuye a la idea de considerar que la grieta es consecuencia de la subsidencia.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		



<b>FICHA Nº 23</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Zona Inundable afectada por subsidencia	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Vivienda en zona inundable	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>ZI-01</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,615996 N	1,677313 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	616735	4164033
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
2011	Septiembre de 2012	No
<b>CARATERÍSTICAS</b>		
Vivienda de nueva construcción con todos los trámites legales: licencia, proyecto, etc.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-1,10	0,000586 (alta)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
El agua alcanzó una altura inicial de más de 3 m (marcada en rojo en la imagen). La marca inferior, en la que aún se aprecian los sedimentos adheridos a la fachada, se debe a que el agua estuvo estancada durante varias semanas, algo que también pudo estar influenciado por la barrera artificial que supone la Autovía Lorca-Águilas, hasta que fue drenada de forma artificial.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		



<b>FICHA Nº 24</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	Zona Inundable afectada por subsidencia	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Vivienda en zona inundable	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>ZI-02</b>	
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Pedanía de Campillo	
<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>	Latitud	Longitud
	37,611963 N	1,687875 W
<b>COORDENADAS UTM</b>	X	Y
	615807	4163573
<b>Fecha de construcción</b>	<b>Aparición de incidencias</b>	<b>Reparaciones / Actuaciones</b>
2011	Septiembre de 2012	Sí
<b>CARACTERÍSTICAS</b>		
Vivienda de nueva construcción con todos los trámites legales: licencia, proyecto, etc.		
<b>VALORES DE SUBSIDENCIA</b>	<b>Hundimiento medio (m)</b>	<b>Distorsión media</b>
	-1,25	0,00025(baja)
<b>DETALLE DE LAS PATOLOGÍAS</b>		
La vivienda se vio inundada, aunque la altura del agua no alcanzó cotas tan altas como en la vivienda de incidencia ZI-01.		
<b>DESCRIPCIÓN GRÁFICA</b>		
		